

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة ابي بكر بلقايد تلمسان

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID- TLEMSEN

FACULTE DE TECHNOLOGIE



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master

En Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Présenté par :

Mlle. GOUAL WISSAM

Analyse de l'influence de la chronologie des travaux et des terrassements sur la stabilité des rives de barrage en terre

Devant le jury composé de :

Mr. BEDJAOUI MOHAMED CHAKIB

Président

Mme. BENHACHILIF SOUAD

Examinatrice

Mme. SMAIL NADIA

Encadrante

Mr. ROUISSAT BOUHRIT

Co-Encadreur

Année 2018/2019

Remerciements

Avant tous, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a aidé et donné la volonté et le courage d'entamer et de terminer ce mémoire.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mme. SMAIL Nadia et Mr. ROUISSAT Bouchrit, on les remercie pour la qualité de leur encadrement exceptionnel, pour leur patience, leur rigueur, leur disponibilité, leurs conseils éclairés et les encouragements durant notre préparation de ce mémoire.

Mille fois merci Mr. ROUISSAT Bouchrit et Mme. SMAIL Nadia.

J'exprime, aussi ma reconnaissance et ma gratitude aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail en y joignant leurs temps, leurs savoirs et leurs expériences.

Je n'oublierais pas tous mes professeurs de l'université d'Abou Bekr Belkaid Département GENIE CIVIL qui m'ont donné le savoir et la formation requise.

À mes parents, mon frère qui ont supporté avec moi toutes les difficultés matériels, financières et morales qui se sont posées à moi pendant la période de réalisation de ce travail.

Est agréable d'exprimer nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidé à élaborer ce mémoire et à toute personne ayant participé à notre "confection " que ce soit sur le plan éducatif ou instructif.

Dédicaces

Ce travail n'a pas pu être réalisé sans l'appui et les efforts fournis par les personnes chères à mon cœur, c'est pour cela que je dédie en premier temps ce modeste travail à mes chers parents BENAMAR et AMMARA; exemple de labeur, d'amour et d'inlassable dévouement. En témoignage de mon amour filial et de mon infinie reconnaissance pour les efforts et les sacrifices déployés à mon égard. Que ma réussite soit pour vous un gage de remerciement et sincère attachement.

A toute ma grande famille GOUAL et HADJAL

En spécial mon frère NADIR et mon fiancé MOHAMED

Ma grand-mère, mes oncles et en particulier NESRADDIN, mes chères tantes

Mes cousins et cousines : ESMA, FARAH, NADJLAA et SALIMA

Et bien sûr à tous mes amis sans exception et en particulier YAMINA, NADIA, MAGHNIA

Aussi à tous mes amis de classe M2 (Géotechnique) et en particulier :

AZOUZI WALID, YAHOUNI.W, YOUNES, IBRAHIM,

ANISSE, WASSILA et SARA.

WISSAM

Résumé

La conception des barrages en terre exige la projection des évacuateurs de crues isolés du corps du barrage. Ceci est souvent obtenu en les translatant sur l'une des rives en fonction, essentiellement, des critères topographiques et géologiques. Souvent, lors des terrassements de l'emprise des évacuateurs de crues, sur des profondeurs relativement importantes, des pathologies se manifestant par des glissements de terrains sont enregistrées. Ces situations géotechniques portent préjudice aux délais de réalisation et aux coûts financiers des aménagements. La nature géologique des versants, notamment celle marneuse et/ou argileuse exige une attention particulière en termes de chronologie des travaux sur la digue et sur l'évacuateur ainsi qu'en termes de modes de terrassements. Le barrage de Tamallahet, situé dans la Daira de Lardjem, wilaya de Tissemsilet, d'une hauteur de 17 m constitue une véritable illustration du phénomène. Les terrassements opérés dans la zone de l'évacuateur de crues en rive gauche (environ 40 000 m³) ont provoqué le glissement d'un important versant marneux (100 de hauteur) nécessitant l'arrêt du chantier, l'expertise du phénomène ainsi que la proposition de solutions de confortement. Au niveau du présent projet de fin d'études, nous nous sommes intéressés à l'analyse de la stabilité du versant dans différents cas de figures: profil naturel du versant, influence des terrassements sur la stabilité, influence de la chronologie des travaux (butée engendrée par les remblais de la digue avant les terrassements de l'évacuateur de crue) et enfin, le reprofilage du versant avant d'entamer les terrassements sur la rive gauche. Les différents cas de situations analysés ont élucidé l'influence des terrassements, de la chronologie des travaux ainsi que le traitement de la zone de l'évacuateur à travers les critères de stabilité se traduisant par des coefficients de sécurité au glissement acceptables.

Mots clés : barrage en terre, évacuateur de crue, terrassements, stabilité versants, rives.

Abstract

The design of earth dams requires the projection of spillways isolated from the body of dams. This is often achieved by translating them to one of the shores based, essentially, on topographic and geological criteria. Often, during the excavation of the spillways right-of-way, at relatively large depths, pathologies manifested by landslides are recorded. These geotechnical situations are detrimental to the timeframe for completion and the financial costs of development. The geological nature of the slopes, especially the marly and / or clayey ones, requires particular attention in terms of the chronology of the works on the dike and the spillway and in terms of earthworks. The dam Tamallahet, located in the Daira Lardjem, wilaya Tissemsilet, a height of 17 m is a true illustration of the phenomenon. Earthworks carried out in the area of the spillway on the left bank (about 40 000 m³) caused the slipping of a large marly slope (100 of height) requiring the stop of the building site, the expertise of the phenomenon as well as the proposal of comfort solutions. At the level of the present end-of-studies project, we are interested in the analysis of slope stability in different scenarios: natural slope profile, influence of earthworks on stability, influence of the chronology of works (abutment). Generated by the embankments of the dike before the earthworks of the spillway) and finally, the reprofiling of the slope before starting the earthworks on the left bank. The different cases analyzed analyzed the influence of the earthworks, the chronology of the works as well as the treatment of the evacuator zone through the stability criteria resulting in acceptable sliding coefficients of safety.

Key words: earth dam, spillway, earthworks, slope stability, shorelines.

ملخص

يتطلب تصميم السدود الترابية إسقاط المجاري المعزولة عن جسم السدود. يتم تحقيق ذلك غالبًا عن طريق تحويلها إلى أحد الشواطئ استنادًا إلى المعايير الطبوغرافية والجيولوجية. غالبًا ما يتم تسجيل العراقيل التي تتجلى في الانهيارات الأرضية أثناء التنقيب عن ممرات الانفاق مباشرة ، في أعماق كبيرة نسبيًا. هذه المواقف الجيوتقنية ضارة بالإطار الزمني للإنجاز والتكاليف المالية للتنمية. تتطلب الطبيعة الجيولوجية للمنحدرات ، خاصة المنحدرات الرخوية و / أو الطينية ، اهتمامًا خاصًا من حيث التسلسل الزمني للأعمال على السد والمجرى المائي ومن حيث الأعمال الترابية. السد تمالاحيت ، الواقع في دائرة لرجيم بولاية تيسمسيليت ، على ارتفاع 17 متر هو مثال حقيقي على هذه الظاهرة. تسببت أعمال الحفر التي نفذت في منطقة المجرى المائي على الضفة اليسرى (حوالي 40000 م 3) في انحدار منحدر رخامي كبير (100 ارتفاع) يتطلب إيقاف موقع المبنى ، وتجربة الظاهرة وكذلك اقتراح حلول الراحة. على مستوى مشروع نهاية الدراسات الحالي ، نحن مهتمون بتحليل استقرار المنحدر في سيناريوهات مختلفة: صورة المنحدر الطبيعي ، وتأثير الأعمال الترابية على الاستقرار ، وتأثير التسلسل الزمني للأعمال (التأخير). الناتجة عن سدود السد قبل أعمال الحفر من المجرى المائي) وأخيرًا ، إعادة صياغة المنحدر قبل بدء أعمال الحفر على الضفة اليسرى. الحالات المختلفة التي تم تحليلها حلت تأثير الأعمال الترابية ، والتسلسل الزمني للأعمال وكذلك معالجة منطقة الإخلاء من خلال معايير الاستقرار مما أدى إلى معاملات انزلاق مقبولة للسلامة.

الكلمات المفتاحية : سد ترابي، المجرى المائي، أعمال الحفر، استقرار المنحدر، السواحل.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	16
Chapitre I : Travaux de terrassements	20
I. Introduction	21
II. Définitions.....	21
III. Différentes étapes de travaux de terrassement	21
III.1.Etude de sol.....	21
III.2. Préparation du terrain	29
III.3. Décapage en surface (décapage de la terre végétale)	29
III.4.Extraction	29
III.5.Systèmes d'évacuation des eaux	29
III.6.Fouilles et tranchées	30
IV. Pente des talus	31
IV.1.Angle des talus.....	32
IV.2.Quelques valeurs usuelles des paramètres de terrassement	33
V. Stabilités des talus.....	33
V.2. Etayage des fouilles	34
VI .Conclusion :	35
Chapitre II : Stabilité des pentes	29
I. Introduction	30
II. Définition d'une pente.....	30
II.2. Pentas artificiels.....	31
III. Les mouvements de terrain.....	32
III.1. Définition des mouvements des terrains.....	32
III.2. Typologie des mouvements de terrain	33
III.3. Facteurs d'évolution et d'activation d'un glissement de terrain.....	36
III.4.Effets et conséquences	37
IV. méthodes d'analyse de stabilité des pentes	37
IV.1. Méthodes déterministes	37
a) Méthode de Taylor (1937).....	39
b) Méthode de Raulin (Méthode des perturbations 1974).....	40
c) Méthode des tranches.....	41

IV.2. Méthodes probabilistes	44
IV.3. Méthodes numériques	46
V. Techniques de stabilisation	46
V.1) Terrassements	46
V.2) Techniques courantes de drainage	48
V.3) Introduction d'éléments résistants	48
V.4) Protection passive et surveillance (mise en œuvre impossible de techniques de stabilisation).....	50
VI. Conclusion:	50
Chapitre III : Les évacuateurs de crue des barrages en terre	51
I. Introduction	52
II. Catégories des évacuateurs de crue.....	52
II.1. Déversoir de surface	52
II.2. Evacuateur en charge	54
II.3. Evacuateur de surface à seuil mobile	56
II.4. Evacuateur vannées	56
II.5. Evacuateur de crue à hausses fusibles	57
II.6. Evacuateur à faible charge.....	58
III. Les évacuateurs de crues des petits barrages.....	59
III.1. Conception du seuil déversant	59
III.2. Entonnement frontal ou latéral pour un évacuateur rectiligne	59
III.3. Implantation et dimensionnement.....	59
IV. Impact des terrassements dans la zone des évacuateurs de crues des barrages en terre	60
V. Conclusion :	62
Chapitre IV : Analyse de la stabilité de la rive gauche du Petit barrage de "Tamellahet"	63
I. Introduction :	64
II. Opportunité et consistance du travail.....	64
III. Le glissement de talus de la rive gauche du petit barrage de "Tamellahet" :.....	66
III .1. Contexte d'analyse.....	66

III.2. Historique et manifestations relatives au glissement	66
IV. Présentation du code de calcul servant à l'étude de stabilité	71
IV.1.Introduction	71
IV.2.Objectif de Plaxis :	72
IV.3.Les points forts de Plaxis	72
IV.4.Les modèles de comportement utilisés dans Plaxis :	73
V. Etude de stabilité de talus de la rive gauche du petit barrage de "Tamellahet" :	74
V.1. Considérations générales	74
V.2. Résultats de la modélisation.....	75
V.3. Synthèse des résultats et interprétation	85
CONCLUSION GENERALE.....	88
Références bibliographiques.....	91

Liste des figures

Figure I.01 : Schéma déblai – remblai.....	25
Figure I.02 : Dispositions pour l'étayement des fouilles.....	28
Figure II.01 : classification des mouvements de terrain.....	34
Figure II.02 : influence du facteur temps sur la stabilité.....	35
Figure II.03: Analyse d'un talus en rupture plane (pente finie).....	38
Figure II.04 : Analyse d'un talus en rupture plane (pente infinie).....	39
Figure II.05 : Analyse d'un talus homogène.....	40
Figure II.06 : Schéma pour la méthode de perturbation.....	41
Figure II.07 : Forces considérées par la méthode des tranches.....	41
Figure II.08 : Principe du remblai de pied.....	47
Figure II.09 : Principe de l'allègement en tête.....	47
Figure II.10 : Principales techniques de stabilisation des talus de déblai.....	48
Figure II.11 : Principe du clouage et exemple de réalisation, image SIMPRO.....	49
Figure III.01 : Evacuateurs de crues en siphon.....	56
Figure III.02 : Evacuateurs vannés.....	57
Figure IV.01 : Situation du petit Barrage Tamellahet et configuration topographique du versant gauche.....	65
Figure IV.02: Plans de situation des ouvrages du petit Barrage Tamellahet.....	65
Figure IV.03: Menu de la fenêtre des entrées du programme.....	72
Figure IV.04 : Fenêtre des paramètres de Mohr –Coulomb.....	74
Figure IV.05 : Profil en travers du versant gauche du barrage.....	75
Figure IV.06 : Représentation du modèle géométrique du projet - Cas N°01.....	76
Figure IV.07 : Profil du talus avec conditions aux limites- Cas N°01.....	76
Figure IV.08. Maillage du modèle- Cas N°01.....	77
Figure IV.09 : Valeurs des contraintes effectives- Cas N°01.....	77
Figure IV.10 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N°01.....	78

Figure IV.11 : Profil du versant après déblaiement- Cas N°02.....	79
Figure IV.12 : Profil de talus avec conditions aux limites- Cas N°02.....	79
FigureIV.13 : Schéma représentatif de la déformation du maillage- Cas N°02.....	80
Figure IV.14 : versant après déblaiement : contraintes effectives- Cas N°02.....	80
Figure IV.15 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N°02.....	81
FigureIV.16 : Déformation du massif-Cas N° 02 avec influence de la cohésion(C= 10 KPa).....	82
FigureIV.17 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N° 02 avec influence de la cohésion(C= 10 KPa).....	82
FigureIV.18 : Déformation du massif-Cas N° 02 avec influence de la cohésion(C= 2 KPa).....	82
FigureIV.19 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N° 02 avec influence de la cohésion(C= 2 KPa).....	82
FigureIV.20 : Modèle géométrique-Cas N° 03 avec remblais du barrage à la côte retenue normale.....	83
FigureIV.21 : Déformée-Cas N° 03 avec remblais du barrage à la côte retenue normale.....	83
FigureIV.22 : Contrainte effectives -Cas N° 03 avec remblais du barrage à la côte retenue normale.....	83
FigureIV.23 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N° 03 avec remblais du barrage à la côte retenue normale.....	83
FigureIV.24 : Modèle géométrique-Cas N° 04 avec remblais du barrage à la côte crête.....	84
FigureIV.25 : Déformée-Cas N° 04 avec remblais du barrage à la côte crête.....	84
FigureIV.26 : Contrainte effectives -Cas N° 04 avec remblais du barrage à la côte crête.....	84
FigureIV.27 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N° 04 avec remblais du barrage à la côte crête.....	84
FigureIV.28 : Modèle géométrique-Cas N° 05 avec reprofilage du versant.....	85
FigureIV.29 : Déformée- Cas N° 05 avec reprofilage du versant.....	85
FigureIV.30 : Contrainte effectives - Cas N° 05 avec reprofilage du versant.....	85
FigureIV.31 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N° 05 avec reprofilage du versant.....	85

Liste des photos

Photo I.01 : fouilles verticales avec blindage.....	23
Photo I.02 : fouilles talutées.....	24
Photo II.1 : Glissement de terrain de l'Harmalière (actif) sur la commune de Sinard(Trièves, Isère).....	33
Photo II.02 : Chutes de blocs sur la RD 526 entre Mens et Clelles (Isère) Septembre 2001...36	
Photo II.3 : Paroi berlinoise (profilés métalliques) soutenant le cimetière marin de Varenghé ville-sur-Mer.....	49
Photo II.4 : Exemple des Ruines de Séchilienne : 2 déviations de l'ex-RN91, merlon de protection, dérivation de la Romanche, travaux d'aménagement hydraulique, plan de secours, expropriations.....	50
Photos III.01 : Evacuateur de crues à déversoir latéral.....	53
Photos III.2 : Evacuateurs de crues à déversoir frontal.....	53
Photos III.03 : Evacuateurs de crues portés par les barrages.....	54
Photos III.04 : Evacuateurs de crues en puits.....	55
Photos III.05 : Evacuateurs de crues en siphon.....	56
Photos III.06 : Barrages mobiles.....	56
Photos III.07 : Evacuateurs vannés.....	57
Photos III.08 : Evacuateurs à hausses fusibles.....	58
Photos III.09 : Evacuateurs à faible charge.....	58
Photos III.10 : Types de terrassements pour évacuateurs de surface des barrages en terre Barrage SIKKAK, Wilaya de Tlemcen.....	61
Photo IV.01: Terrassements effectuées au pied de la rive gauche du barrage pour évacuateur des crues.....	67
Photo IV.02 : Apparition des fissures au niveau de la plate-forme effectuée au pied de la rive gauche pour la réalisation de l'évacuateur des crues.....	67
Photo IV.03 : Pente avant et après terrassement.....	68
Photo IV.04 : Des glissements localisés.....	68
Photo IV.05 : Fissures pour différents plans de glissement avec un déplacement important (≈1,60m).....	69
Photo IV.06 : Apparition des fissures dues à l'instabilité de la pente avec loupes de glissement.....	69

Photo IV.07 : Apparition des glissements superficiels.....	70
Photo IV.08 : Glissement d'un massif meuble et hétérogène.....	70

Liste des tableaux

Tableau I.01 : Blindage des fouilles.....	24
Tableau I.02 : classification selon les difficultés d'extraction.....	26
Tableau I.03: Angles des talus en fonction des conditions du taux d'humidité du sol.....	27
Tableau I.04: Valeurs des angles de talutages en fonction.....	27
Tableau II.01 : Apport des méthodes dérivées par rapport à la méthode de Taylor.....	40
Tableau IV.1 : Caractéristiques des matériaux utilisées dans la modélisation.....	75
Tableau IV.2 : Synthèse des résultats d'analyse de la stabilité du versant.....	86

Liste des abréviations

PLU : Plan Local d'Urbanisme

Φ : l'angle de frottement interne

FS : facteur de sécurité

σ_g : contrainte normale transmise aux grains du sol

C : cohésion (forces de "liaison" entre les particules du sol)

W = poids d'une tranche de largeur b et de hauteur h ;

N = force normale à la base de la tranche ;

T = force de cisaillement mobilisée sur la base de chaque tranche ;

ED= force inter-tranches horizontale normale du côté droit de la tranche ;

EG = force inter-tranches horizontale normale du côté gauche de la tranche ;

X = forces verticales inter-tranches de cisaillement ;

D = charge externe ;

KW = charge sismique horizontale appliquée au centre de la surface de chaque tranche ;

R = rayon pour une surface de glissement circulaire ou le bras de levier du moment associé à la force de cisaillement mobilisée T pour toute forme de surface de glissement ;

f = excentricité de la force normale au centre de la rotation ou au centre des moments ;

x = distance horizontale entre la ligne centrale de chaque tranche au centre de la rotation ou au centre des moments ;

e = distance verticale du centre de la surface de chaque tranche au centre de la rotation ou au centre des moments ;

d = distance de l'effort D au centre de la rotation ou au centre des moments ;

h = hauteur verticale moyenne de chaque tranche ;

a = distance perpendiculaire de la force latérale résultante de l'eau au centre de rotation ou au centre des moments ;

AW= forces latérales résultantes de l'eau ;

ω = angle entre l'effort D et l'horizontale ;

α = angle entre la tangente au centre de la base de chaque tranche et l'horizontale ;

b = largeur de la base de chaque tranche.

λ = le pourcentage (en forme décimale) de la fonction utilisée ;

$F(x)$ = la fonction de la force inter-tranches représentant la direction relative de la force résultante inter-tranches

EVC : L'évacuateur de crue

BCV : Béton conventionnel vibré.

BCR : Béton compacté au rouleau.

PHE : Plus hautes eaux.

ε : la déformation unitaire dans la direction de la contrainte

σ : la contrainte

E : le module de Young du matériau.

Ψ : l'angle de dilatance

ν : le coefficient de Poisson

INTRODUCTION GENERALE

Les glissements de terrain apparaissent lorsque les sols ou des roches se déplacent, fragilisés par les activités humaines ou par des phénomènes naturels qu'ils soient climatiques, géologiques ou encore géomorphologiques. En général plutôt lents, quelques millimètres ou mètres annuels, les déplacements des matériaux rocheux peuvent atteindre la vitesse de quelques mètres par seconde au moment du déclenchement du glissement. Leur composition influe sur leur gravité, ils sont destructeurs lorsque ils sont composés d'eau (à au moins 30 %), ils forment alors des coulées torrentielles. Certains matériaux réagissent particulièrement aux glissements de terrain, comme les argiles, les marnes, les gypses ou les formations superficielles d'altérites.

Les glissements de terrain se produisent sous l'action d'un (ou plusieurs) facteurs déclenchant, qui rompt l'équilibre, soit au niveau des forces massiques, soit au niveau des forces extérieures, ou au niveau des forces de liaison dans le massif. Certains de ces facteurs déclenchant sont naturels, tels que séismes, érosions, fluctuation des écoulements hydrauliques, altération, etc. A l'échelle des travaux de génie civil, l'activité humaine s'ajoute à ces facteurs naturels et constitue fréquemment un facteur essentiel dans la rupture de l'équilibre des massifs. Du seul point de vue du rôle de l'activité humaine, le sujet à traiter est très vaste, puisqu'il couvre des matériaux très divers, des argiles molles aux massifs rocheux, et des ouvrages très variés (barrages, ports, bâtiments, infrastructures, etc.).

La stabilité des ouvrages en terre (déblais, remblais, digues) et des pentes naturelles est un problème qui préoccupe les géotechniciens tant praticiens que chercheurs. Les désordres engendrés par la rupture des pentes sont généralement spectaculaires, souvent destructifs et parfois meurtriers. De nombreuses méthodes de calcul de stabilité ont été proposées. Elles s'accordent toutes à définir un coefficient de sécurité global en fonction duquel la stabilité du talus étudié est considérée comme assurée ou compromise, ou par des coefficients de sécurité partiels affectant, d'une part, les sollicitations appliquées et, d'autre part, les propriétés mécaniques des sols. Diverses techniques de renforcement des talus ont par ailleurs été développées. Elles se différencient par le procédé de leur réalisation, leur coût et leur durabilité.

Au niveau des chantiers de barrages, les lots relatifs aux terrassements de divers types sont importants et complexes. En effet, les terrassements se réalisent sur des hauteurs, largeurs, profondeurs et pentes importantes et nécessitent par conséquent des données relatives à la caractérisation des matériaux et leur vulnérabilité au glissement, à la configuration du profil à terrasser (remblai, déblai, suppression de butée...etc) ainsi qu'aux conditions climatiques pendant lesquelles les travaux sont réalisés.

Dans un aménagement de barrages, plusieurs lots sont lancés des travaux en parallèle : les remblais ou bétons du corps du barrage, l'ouvrage d'évacuation des crues, l'ouvrage de prise et de vidange ainsi que certains travaux liés aux divers traitements des zones externes (injections, drainages...etc).

Pour les barrages en terre, les évacuateurs de crues sont généralement projetés sur l'une des rives du barrage. On choisit, soit l'appui qui permet le trajet le plus court pour atteindre l'aval du barrage, soit l'appui le plus rigide qui constituera la meilleure fondation, soit l'appui le moins raide pour diminuer les difficultés de terrassement.

Les évacuateurs de crues de petits barrages sont en général de surface à entonnement latéral ou frontal. Les côtes de terrassement doivent atteindre la côte de la retenue normale près de la zone de déversement pour atteindre celle du lit d'oued en aval après restitution de la crue de projet.

Les terrassements des évacuateurs de petits barrages, implantés au niveau des versants de rives, notamment argileux et de hauteurs importantes, peuvent causer des préjudices importants par rapport à la stabilité des versants (suppression des butées). La cadence des travaux exigée, la chronologie conjuguée des travaux entre les remblais du barrage et ceux de l'évacuateur de crue et la nature instable des versants sont des paramètres capitaux à intégrer, d'une manière solidaire pour les décisions à prendre.

La nature géologique du versant sur lequel est implanté l'ouvrage d'évacuation, la configuration et les caractéristiques de son profil, la position et des profondeurs de terrassement de la zone de l'évacuateur par rapport au profil du versant sont autant de paramètres à considérer dans l'investigation géotechnique complémentaire. Cette investigation doit définir, par anticipation, et évaluer le risque et l'influence des

terrassements au niveau la zone de l'évacuateur sur le projet lui-même, ses délais et ses coûts.

Partant de cette problématique, le présent projet de fin d'études vise une analyse de la stabilité de versants sur lequel est implanté un évacuateur de crue d'un barrage en terre. Il s'agit du barrage à noyau central de Tamallahet, situé dans la Daira de Lardjem, wilaya de Tissemsilet, d'une hauteur de 17 m. Les terrassements opérés dans la zone de l'évacuateur de crues, en rive gauche (environ 40 000 m³), ont provoqué le glissement d'un important versant marneux (100 de hauteur). Ces terrassements ont été réalisés sur des largeurs d'emprise dépassant les 8 m et des profondeurs atteignant 7 m. Initialement, la pente de ce talus était de 16 à 18%, après terrassements on atteint une valeur de pente de 110% (angle de pente 47°). L'inclinaison du talus étant supérieure aux valeurs des angles de frottements des sols constituant le talus, ce dernier, a glissé massivement. Cette situation a exigé l'arrêt du chantier pour la reprise des études relatives à la stabilisation du glissement.

Dans le présent mémoire, plusieurs variantes d'analyse ont été étudiées et permettant de dégager des solutions quant à la contrainte liée à la stabilité du versant devant abriter l'ouvrage d'évacuation des crues:

- Agir sur la chronologie des travaux en privilégiant l'exécution des remblais de la digue constituant une butée au glissement éventuel,
- Traiter et reprofiler le versant avec des risbermes et des pentes inférieures à l'angle de frottement interne des matériaux,
- Echelonner la cadence des terrassements dans le sens du tracé de l'évacuateur de crue.

Toutes ces solutions doivent être recherchés et analysées avant le lancement des travaux pour éviter l'arrêt du chantier et les surcoûts éventuels.

L'élaboration du travail dans le cadre de ce mémoire de master, s'intégrant dans la thématique de l'analyse de la stabilité des pentes a été étoffée par de multiples recherches bibliographiques liées à l'acquisition d'un niveau de connaissances approfondi sur les règles et normes de terrassements, sur la caractérisation et les critères d'analyse de la stabilité des pentes ainsi que sur les évacuateurs de crues des barrages.

Enfin, pour répondre à tous ces objectifs, le mémoire et dans un soucis de cohérence dans sa forme globale a été structuré en 04 chapitres en l'occurrence:

Chapitre 1 : Travaux de terrassements

Chapitre 2 : Stabilité des pentes

Chapitre 3 : Ouvrages d'évacuation de crues des barrages

Chapitre 4 : Analyse de l'influence des terrassements sur la stabilité des rives du barrage.

Chapitre I : Travaux de terrassements

I. Introduction

Pour construire un ouvrage, quel qu'il soit (tunnel, route, pont, bâtiment, barrage, ...), il est nécessaire de modifier le terrain naturel. Il faut profiler la surface du terrain de telle sorte qu'il soit apte à supporter le poids de l'ouvrage et à en intégrer la forme. L'ensemble de ces opérations s'appelle "le terrassement".

Terrasser est un travail composite pouvant comprendre :

- De l'extraction de matériaux, au compactage, avec peut être du décapage de la terre végétale, et de la mise en dépôt des terres.

Il n'existe pas un seul matériau à terrasser mais plusieurs sortes possibles : Rochers - terre - gravier et sable - limon – argile

Il est à noter que les modes de quantification pour la facturation sont fonction du type de terrassement, de la nature du terrain, des dimensions des fouilles et de l'accessibilité du site.

II. Définitions

Le terrassement est effectué par le terrassier et consiste à modifier l'aspect initial du terrain. En terrassement, on effectue des remblais et des déblais.

Le remblai permet de combler les creux et correspond à l'étape du nivellement. Ensuite vient le déblai, qui correspond à l'étape des fouilles. [1]

Lors des travaux de terrassement le matériau extrait s'aère et produit un volume plus important. Cette augmentation de volume s'appelle le foisonnement. Ce phénomène varie avec la nature de la terre. [2]

Le terrassement permet de préparer un terrain à bâtir avant la construction. Il s'effectue en déplaçant les différents matériaux se trouvant dans le sol : terre, argile, sable, roches, cailloux, verre, détritiques, etc.

Il permet aussi à notre construction finale d'être bien stable. Grâce à cette étape préparatoire des travaux, nous pouvons éviter les tassements, glissements ou autres effondrements de sol. [1]

III. Différentes étapes de travaux de terrassement

Le terrassement fait référence à plusieurs étapes préparatoires de travaux, les étapes à réaliser sont souvent semblables et elles dépendent en grande partie de la nature du sol et de la superficie à terrasser.

III.1. Etude de sol

Selon la nature des travaux à envisager, plusieurs actions nécessaires à l'étude de sol vont devoir être envisagées. L'analyse du sol est à la fois géologique et géotechnique. Le professionnel va devoir déterminer quelles opérations seront à effectuer lors du

terrassment en fonction des propriétés physiques et mécaniques du terrain à terrasser. Un sondage en profondeur réalisé par une machine de forage peut être indispensable pour obtenir des échantillons représentatifs des propriétés chimiques du sol. Dans le même esprit, le degré sismique de l'espace à construire sera obligatoirement étudié si la zone est à risques... Le rôle du professionnel en charge du diagnostic va être de répertorier les données utiles à la réalisation du projet, de calculer les besoins nécessaires aux fondations, d'exploiter les informations relatives à la réutilisation des différents types de terre et de dessiner une carte en différenciant chaque parcelle. La cartographie numérique est une des méthodes les plus employées actuellement. Les relevés sont fiables et très complets. [3]

III.2. Préparation du terrain

Préparer le terrain revient à mesurer précisément et à établir un bornage ou un piquetage en fonction du plan initial. Le professionnel à contacter pour cette étape est le géomètre. Habilité à délimiter de façon officielle toute parcelle de terrain, il vous donne exactement les limites de votre parcelle et vous permet de visionner précisément chaque espace. Il aide entre autres à identifier les zones à dédier aux canalisations et à définir exactement les différents niveaux d'un terrain. Le passage du géomètre peut être une étape obligatoire. Le montant de cette prestation varie selon les tarifs pratiqués par le professionnel pour ses déplacements, selon la superficie à borner et les besoins spécifiques en fonction des travaux envisagés. Si plusieurs cabinets de géomètres sont disponibles dans votre localité, n'hésitez pas à demander un devis à chacun d'eux afin de choisir la meilleure offre. Vérifiez également la disponibilité des géomètres. En effet, ces professionnels sont très sollicités tant dans le domaine privé que public et les délais peuvent être longs. [3]

III.3. Décapage en surface (décapage de la terre végétale)

On enlève la terre végétale pour conserver les couches du sol les plus aptes à la construction.

L'épaisseur de la couche à décaper varie de 20 à 30 cm. On quantifie souvent ce décapage en m².

III.4.Extraction

L'extraction est l'enlèvement de la terre réalisé à l'aide d'engins de chantiers spécifiques tels que la pelle mécanique et la décapeuse ou encore le bulldozer et le chargeur, utile pour déplacer d'un point à un autre de petits volumes de terre. Cette étape est primordiale pour la suite du projet. Le volume de terre et de matériaux à extraire doit être défini parfaitement. Les tracés doivent de la même manière être très précis. . Dans tous les cas, une bonne planification du terrassment fait gagner du temps et donc souvent de l'argent.

III.5.Systèmes d'évacuation des eaux

L'étape incontournable du chantier de terrassment est la conception du système d'évacuation des eaux de façon à limiter les risques d'infiltration et à éviter les dégâts dus à la stagnation de l'eau. Une pente de 5 % est nécessaire. Elle doit être bornée par un canal

bétonné. La phase suivante est la mise en place de canalisations. Les drains et caniveaux sont installés pour garantir l'évacuation des eaux et éviter le ruissellement. La stabilité du sol est ainsi assurée. Il n'existe alors que peu de risques d'infiltrations d'eau dans les murs de la future fondation. Enfin, des pierres et des gravillons sont disposés en couches superposées pour protéger les drains et autres dispositifs d'évacuation des eaux. Les terrasseurs se fient au contenu du PLU (Plan Local d'Urbanisme) et de la réglementation de la commune pour disposer les canalisations à la profondeur idéale en fonction des besoins. [3]

La présence d'eau dans les sols, modifie de manière non négligeable ses caractéristiques et les modes de terrassements pour cela il faut :

- Collecter les eaux de ruissellement
- Pomper les venues d'eau (faible) ou drainer
- Dans le cas de nappe phréatique avec présence d'eau permanente il faut procéder à un rabattement de nappe par pompage. [4]

III.6.Fouilles et tranchées

Il s'agit ici de former les tranchées où reposeront les fondations de la future construction qu'elles soient superficielles, semi-profondes ou profondes. Le terrain est piqueté et le terrassier sait exactement où creuser et comment. Les tranchées, appelées fond de fouille, vont d'abord accueillir le béton de propreté puis la semelle en béton pour garantir la résistance des fondations. Les fouilles en rigoles représentent les tranchées des fondations destinées à accueillir le béton de propreté par opposition aux fouilles en pleine masse. Leur rôle est primordial pour aider à répartir le poids des murs de soutènement sur le sol. [3]

III.6.1.Mode d'ouverture de la fouille

- a) Ouverture des fouilles verticales :

Elle réduit l'emprise des terrassements mais implique le blindage des parois.

Cette opération consiste à maintenir les parois par l'exécution d'un boisage de retenue. [2]



Photo I.01 : fouilles verticales avec blindage [5]

CHAPITRE I : TRAVAUX DE TERRASSEMENTS

Tableau récapitulatif I.01 : Blindage des fouilles. [4]

Type de blindage	Emploi	Observations
Platelage butonné	Fouille en tranchée provisoire hors nappe	Gêne dans les travaux de terrassement
Tubage	Fouille en puits provisoire présence de nappe admise	
Parois berlinoises	Pleine masse provisoire ou définitif hors nappe ou terrain drain able	Emploi en site urbain ; coffrage de la paroi extérieure ; peu coûteux
Parois moulées	Pleine masse définitif présence de nappe admise	Emploi en site urbain ; s'intègre à la structure du bâtiment ; installation de chantier lourde et relativement coûteuse
Rideaux de palplanches	Pleine masse provisoire présence de nappe ou définitif admise	Nuisance pour les riverains ; récupération aléatoire
Parois clouées	Pleine masse ou provisoire hors nappe	Talutage éventuel ; peu coûteux

b) Ouverture des fouilles talutées

Cela implique de disposer au sol de la surface suffisante, en raison des pentes. [2]



Photo I.02 : fouilles talutées [5]

IV. Pente des talus

Pour obtenir un équilibre stable, nécessaire à la bonne tenue des terres en remblais et des tranchées, il convient de donner aux talus qui limitent ces terrassements une inclinaison convenable. Cette pente peut se définir :

-Soit par la tangente de l'angle (pente) que fait ce talus avec l'horizontale (talus à 4/5 ou à 0.80 m ou encore à 80%)

-Soit par la cotangente de l'angle (inclinaison) dont la valeur s'exprime généralement comme celle de la tangente par une fraction (5/1, 3/2, 1/1, 2/3, etc.).

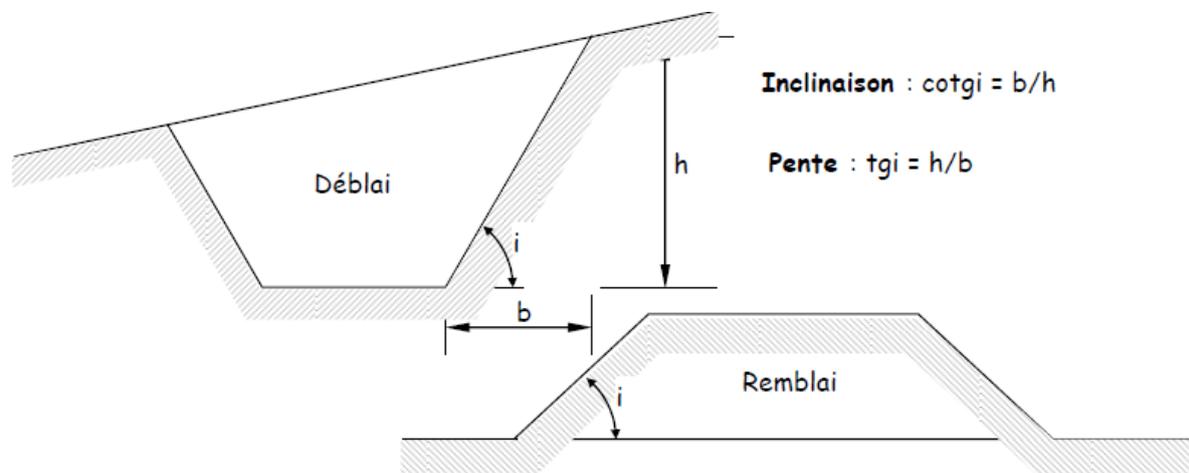


Figure I.01 : Schéma déblai - remblai [4]

IV.1. Angle des talus

L'angle i doit toujours être inférieur à l'angle de frottement interne appelé φ , ce dernier étant caractérisé par ce que l'on appelle la pente naturelle des terres, c'est à dire, l'inclinaison que prend un talus soumis à l'action des seuls agents atmosphériques.

Cet angle de frottement interne dépend essentiellement de la nature du degré de consistance et de la teneur en eau du terrain.

En terrain meubles, le degré de consistance du terrain a une grande influence sur la valeur de l'angle φ , qui est plus grande pour les talus de déblais en terrain non fraîchement remué ou vierge (terrain naturel) que pour les talus de déblais en terrain rapporté ou fraîchement remué et les talus de remblais.

Cette différence tient au fait que le glissement, les unes sur les autres, des particules constituant une terre meuble, rencontre dans des terrains non fraîchement remués, une résistance distincte de celle provoquée par le frottement réciproque des particules. Cette résistance appelée « COHESION », elle est d'ailleurs sujette à s'atténuer ou à disparaître dans les cas de sécheresse, gelée, etc. [4]

En ce qui concerne la teneur en eau du terrain, c'est un correctif important à la valeur de l'angle φ , car elle facilite le glissement des particules les unes sur les autres, en adoucissant leur frottement, ce qui a pour effet de réduire sensiblement cet angle quand le degré

CHAPITRE I : TRAVAUX DE TERRASSEMENTS

d'humidité est élevé. Il faut signaler cependant que les sables humides possèdent une cohésion qu'ils n'ont pas quand ils sont secs ou immergés.

Compte tenu de ces considérations, il faut donc éviter de donner aux talus une pente plus raide que celle du talus naturel de la terre correspondante possédant un degré d'humidité identique. [4]

IV.2. Quelques valeurs usuelles des paramètres de terrassement

Les terrains sont classés selon les difficultés d'extraction :

Tableau 1.02 : classification selon les difficultés d'extraction [4]

Désignation	Nature des terres	Angle du talus naturel	Coefficient de foisonnement
Terrain ordinaire	Sable	10 à 25°	10 à 20 %
	Gravier	30 à 40°	25 %
	Terre végétale	30 à 50°	10 à 25 %
Terrain semi-compact ou moyen	Cailloux	40 à 50°	50 %
Terrain compact	Argile	30 à 50°	25 %
	Marne	30 à 45°	25 %
Roches	Grès tendre	50 à 90°	50 %
	Roches diverses		plus de 50 %

V. Stabilités des talus

V.1. Dispositions géométriques

- La terre mise en tas, lorsqu'elle n'est pas retenue, forme avec la terre, appelé angle de talus naturel.
- Lors des fouilles, si le talus que l'on veut réaliser fait avec l'horizontale un angle inférieur ou égal à l'angle naturel, aucune précaution particulière ne doit être prise.
- Si au contraire l'angle est supérieur à l'angle naturel. Il y a danger d'éboulement et il convient de prendre des dispositions pour les éviter.
- D'une manière générale, lors de l'exécution des terrassements en remblai, le rapport admis entre la base et la hauteur est de 3 à 2.

CHAPITRE I : TRAVAUX DE TERRASSEMENTS

Tableau I.03: Angles des talus en fonction des conditions du taux d'humidité du sol [5]

Nature de terre	Angle du talus naturel	
	Terrain sec	Terrain mouille
Sable fin	± 25°	± 15°
Terre végétale	± 40°	± 30°
Terre très compacte	± 50°	± 40°
Argile	± 40°	± 15°
Cailloux, éboulis	± 50°	± 40°

Pour des raisons évidentes de sécurité, les pentes de talus en déblai ou en remblai doivent assurer la stabilité des matériaux. Les pentes de talus varient selon plusieurs paramètres notamment la nature du sol, la granulométrie et de la cohésion de ses particules et l'immersion ou non de l'ouvrage. Les tableaux suivants nous donnent les valeurs les plus couramment utilisées pour les pentes de talus en déblai et en remblais. [5]

Tableau I.04: Valeurs des angles de talutages en fonction [5]

Type de sol	Délais (en terrain naturel)			
	Zone sèche H/V		Zone immergée H/V	
Rocher compact	80°	1/5	80°	1/5
Roc friable	55°	2/3	55°	2/3
Débris rocheux	45°	1/1	40°	5/4
Terre et pierres	45°	1/1	30°	2/1
Terre argileuse	40°	5/4	20°	3/1
Gravier et sable	35°	3/2	30°	2/1
Sable fin	30°	2/1	20°	3/1

V.2. Etayage des fouilles

- Les fouilles sont exécutées par terrassements successifs de couches de 0.40m de profondeur.
- Lorsque la profondeur d'une fouille est importante, pour prévoir les éboulements et les risques d'accident d'une part et, d'autres part, pour diminuer l'emprise de l'excavation, il est utile, voire nécessaire, d'étayer les terres.
- L'inclinaison des talus naturels, dans un terrain déterminé, peut être défavorablement influencée par certains facteurs extérieurs.
- Les infiltrations d'eau possibles en profondeur, ou provenant des chutes de pluie, l'effet des vibrations provoquées par les engins, les véhicules ou les machines. Les charges situées à proximité immédiates de l'excavation sont des éléments qui modifient les plans de rupture des terrains.

CHAPITRE I : TRAVAUX DE TERRASSEMENTS

- D'une façon générale, toute paroi d'une fouille doit être étayée lorsque la pente des talus excède les rapports suivants.
- 1/1 dans les terrains ébouleux.
- 1/2 dans les terrains tendres mais résistants.
- 1/3 dans les terrains très compacts. [5]

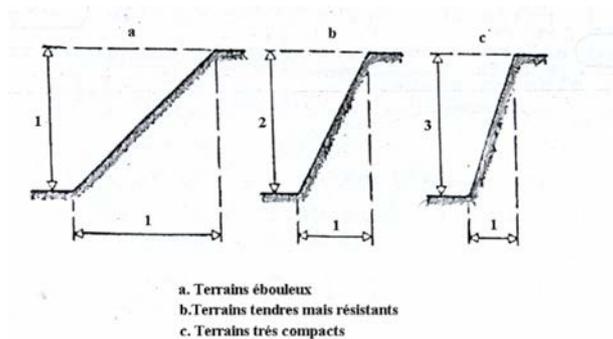


Figure I.02 : Dispositions pour l'étayement des fouilles [5]

VI .Conclusion :

La capacité portante du terrain : Est le premier élément à prendre en compte lors de l'exécution des terrassements, et aussi l'importance de l'ouvrage à édifier qui décide de l'ampleur des moyens de reconnaissances à mettre en œuvre.

Chapitre II : Stabilité des pentes

I. Introduction

Les problèmes de stabilité de pentes se rencontrent fréquemment dans la construction des routes, des canaux, des digues et des barrages. En outre certaines pentes naturelles sont ou peuvent devenir instables. Une rupture d'un talus peut être catastrophique et provoquer des pertes en vies humaines ainsi que des dégâts naturels considérables.

L'estimation de la sécurité réelle vis-à-vis du risque de rupture est une question complexe surtout dans le domaine des données limitées ou peu connues. L'étude d'un talus comporte, outre la reconnaissance du site et le choix des caractéristiques mécaniques des sols, un calcul de stabilité pour déterminer d'une part la courbe de rupture le long de laquelle le risque de glissement est le plus élevé, d'autre part la valeur correspondante du coefficient de sécurité.

Cependant une longue expérience a été acquise tant que les méthodes de calcul que dans les techniques de construction, de telle sorte que les problèmes de stabilité de pentes peuvent maintenant être résolus avec une assez bonne fiabilité.

Les mouvements de terrain sont très variés, par leur nature (glissements de terrains, éboulements rocheux, coulées de boues, effondrements de vides souterrains, affaissements, gonflement ou retrait des sols, ...) et par leur dimension (certains glissements, comme celui de la Clapière dans les Alpes Maritimes, peuvent atteindre plusieurs dizaines de millions de m³).

Dans leur principe, les mouvements de terrain sont bien compris: ils surviennent lorsque la résistance des terrains est inférieure aux efforts moteurs engendrés par la gravité et l'eau souterraine ou par les travaux de l'Homme; leur dynamique répond naturellement aux lois de la mécanique. Dans la pratique cependant, les choses sont très complexes, du fait des incertitudes:

- sur les conditions initiales, notamment en profondeur,
- sur les propriétés mécaniques des terrains, en général hétérogènes, non linéaires, anisotropes discontinus,...
- sur les conditions hydrauliques: position de la nappe, phénomènes se produisant en zone non saturée. L'eau est la cause déclenchant de la plupart des mouvements; c'est un facteur variable dans le temps.

II. Définition d'une pente

Une pente est l'inclinaison d'un terrain .Elle se mesure en degrés ou en pourcentage et ne doit pas être confondue avec le dénivelé, évalué en mètres ou le pendage qui s'applique aux couches du sous - sol. La pente peut être une contrainte naturelle pour l'installation humaine: elle peut être le théâtre d'éboulements, d'avalanches ou de glissement de terrain.

II.1. Pentes naturelles

Il s'agit des talus existants, peu homogènes et présentant des variations géologiques et éventuellement des discontinuités.

II.2. Pentes artificiels

Les pentes artificielles sont essentiellement affectées par des glissements et parfois par des phénomènes du fluage. On peut les classer en fonction des types d'ouvrages :

- Talus en déblai ;
- Talus en remblai sur sol non compressible ;
- Talus en remblai sur sol compressible
- Digues et barrages en terre

Pour chaque type, on peut identifier certains modes de rupture, ils sont distingués ci-dessous. . [6]

II.2.1. Pente en déblais et pente en remblais sur sols non compressibles

Les ruptures ont, d'une façon générale, l'allure de glissements rotationnels circulaires on distingue :

- Les cercles de pentes se produisent généralement dans les sols hétérogènes, la base du cercle correspondant à une couche plus résistante ;
- Les cercles de pied (sont les plus courants dans ce type d'ouvrages) ;
- Les cercles profonds ne se produisent que dans le cas où le sol situé sous le niveau du pied du talus est de mauvaise qualité. . [6]

II.2.2. Pente en remblais sur sols compressibles

La rupture constatée dans remblais en sol compacté (remblai routier par exemple) repose sur une couche d'argile molle, de vase ou de tourbe souvent profonde. Les cercles de rupture sont tangents à la base de la couche molle lorsque celle-ci est relativement peu épaisse. [6]

Si le facteur de sécurité vis-à-vis de la rupture est peu élevé tout en étant supérieur à 1, il peut se produire un fluage du sol de fondation entraînant un tassement anormal du remblai latéral de la couche molle et une perte de résistance du remblai ou de la fondation ou des deux.

II.2.3. Digues et barrage en terre

L'étude de la stabilité des talus amont et aval est la partie essentielle de la conception des barrages en terre .Différent cas doivent être étudiés en tenant compte de l'état des pressions interstitielles à l'intérieur de la digue.

- Pratiquement, on calculera le facteur de sécurité (FS) le long des cercles de glissement supposés;
- Pendant la construction et peu après la construction ;
- Lorsque le barrage vient d'être rempli (avec percolation permanente) ;
- Lors d'une vidange rapide. [6]

III. Les mouvements de terrain

III.1. Définition des mouvements des terrains

Un mouvement de terrain est un déplacement, plus ou moins brutal, du sol ou du sous-sol sous l'effet d'influences naturelles (agent d'érosion, pesanteur, séisme, etc.) ou anthropiques (exploitation de matériaux, déboisement, terrassement, etc.). Ce phénomène comprend diverses manifestations, lentes ou rapides, en fonction des mécanismes initiateurs, des matériaux considérés et de leur structure. [7]

III.1.1.les mouvements lents

Pour lesquels la déformation est progressive et peut être accompagnée de rupture mais en principe d'aucune accélération brutale.

- les affaissements consécutifs à l'évolution de cavités souterraines naturelles ou artificielles (carrières ou mines), évolution amortie par le comportement souple des terrains superficiels,
- les tassements par retrait de sols argileux et par consolidation de certains terrains compressibles (vases, tourbes),
- le fluage de matériaux plastiques sur faible pente,
- les glissements, qui correspondent au déplacement en masse, le long d'une surface de rupture plane, courbe ou complexe, de sols cohérents (marnes et argiles),
- le retrait ou le gonflement de certains matériaux argileux en fonction de leur teneur en eau.

III.1.2.les mouvements rapides

Qui peuvent être scindés en deux groupes, selon le mode de propagation des matériaux, en masse, ou à l'état remanié.

Le premier groupe comprend :

- les effondrements, qui résultent de la rupture brutale de voûtes de cavités souterraines naturelles ou artificielles, sans atténuation par les terrains de surface,
- les chutes de pierres ou de blocs provenant de l'évolution mécanique de falaises ou d'escarpements rocheux très fracturés,
- les éboulements ou écroulements de pans de falaises ou d'escarpements rocheux selon les plans de discontinuité préexistants ;
- certains glissements rocheux.

Le second groupe comprend :

- les laves torrentielles, qui résultent du transport de matériaux en coulées visqueuses ou fluides dans le lit de torrents de montagne
- les coulées boueuses, qui proviennent généralement de l'évolution du front des glissements.

Les mouvements de terrain, qu'ils soient lents ou rapides, peuvent entraîner un remodelage des paysages. Celui-ci peut se traduire par la destruction de zones boisées, la déstabilisation de versants ou la réorganisation de cours d'eau. [7]

III.2. Typologie des mouvements de terrain

III.2.1. Le glissement

Est un déplacement généralement lent (quelques mm par an à quelques mètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture (surface de cisaillement) identifiable, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables. Cette surface est généralement courbe (glissement circulaire), mais elle peut aussi se développer à la faveur d'une discontinuité préexistante telle qu'un joint de stratification (glissement plan). Les profondeurs des surfaces de glissement sont très variables : de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, voire la centaine de mètres pour certains glissements de versant. [8]



Photo II.1 : Glissement de terrain de l'Harmalière (actif) sur la commune de Sinard (Trièves, Isère) [8]

- a) Classification usuelle pour les mouvements de terrain

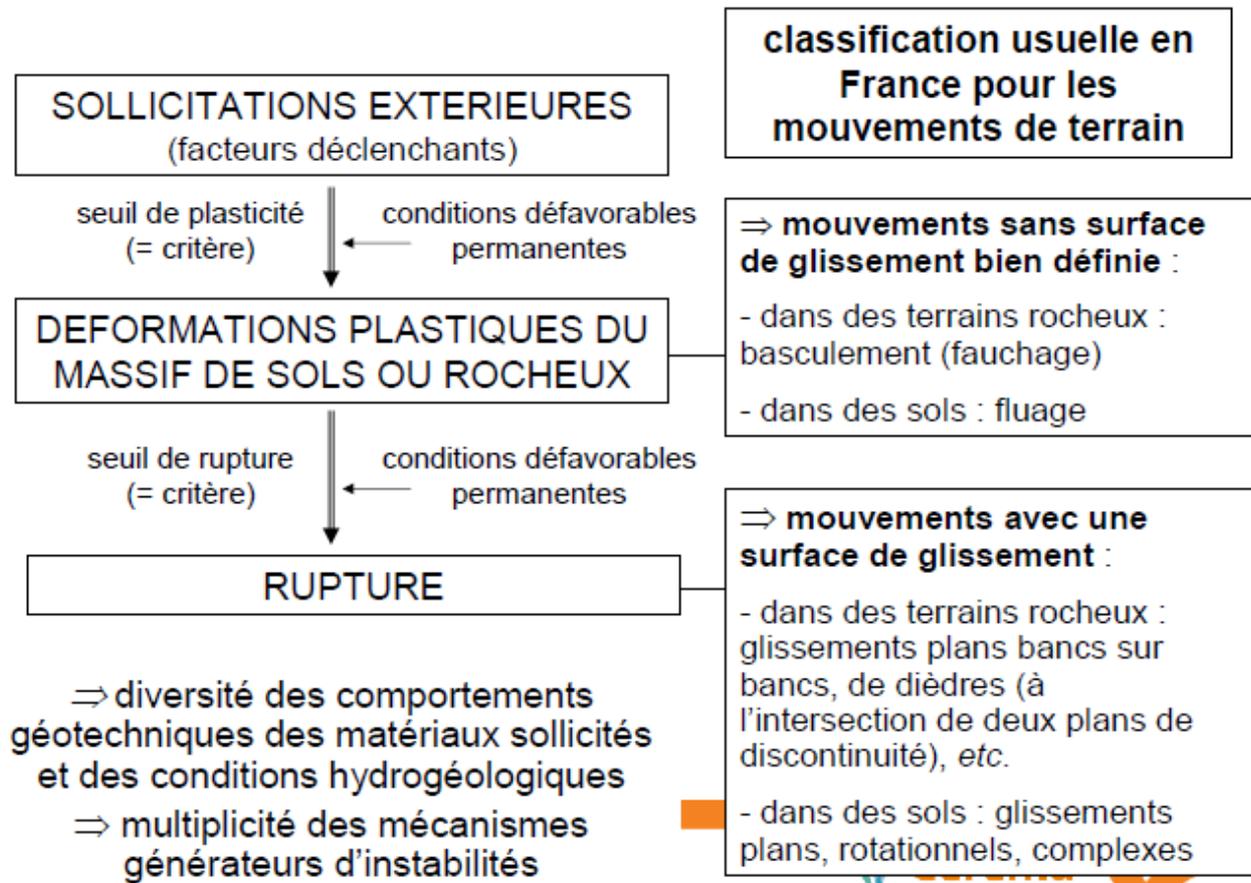


Figure II.01 : classification des mouvements de terrain [8]

b) Éléments essentiels pour l'analyse de stabilité :

-Géométrie du glissement

-Résistance mécanique mobilisable sur la surface de glissement contrainte tangentielle maximale mobilisable dans un sol (résistance au cisaillement) ⇒ relation de Mohr - Coulomb (critère de rupture) :

$$\tau_f = c + \sigma_g \times \tan\phi$$

C : cohésion (forces de "liaison" entre les particules du sol)

σ_g : contrainte normale transmise aux grains du sol

ϕ : angle de frottement interne (forces de frottement entre les particules du sol). [8]

- Intervention du facteur temps :

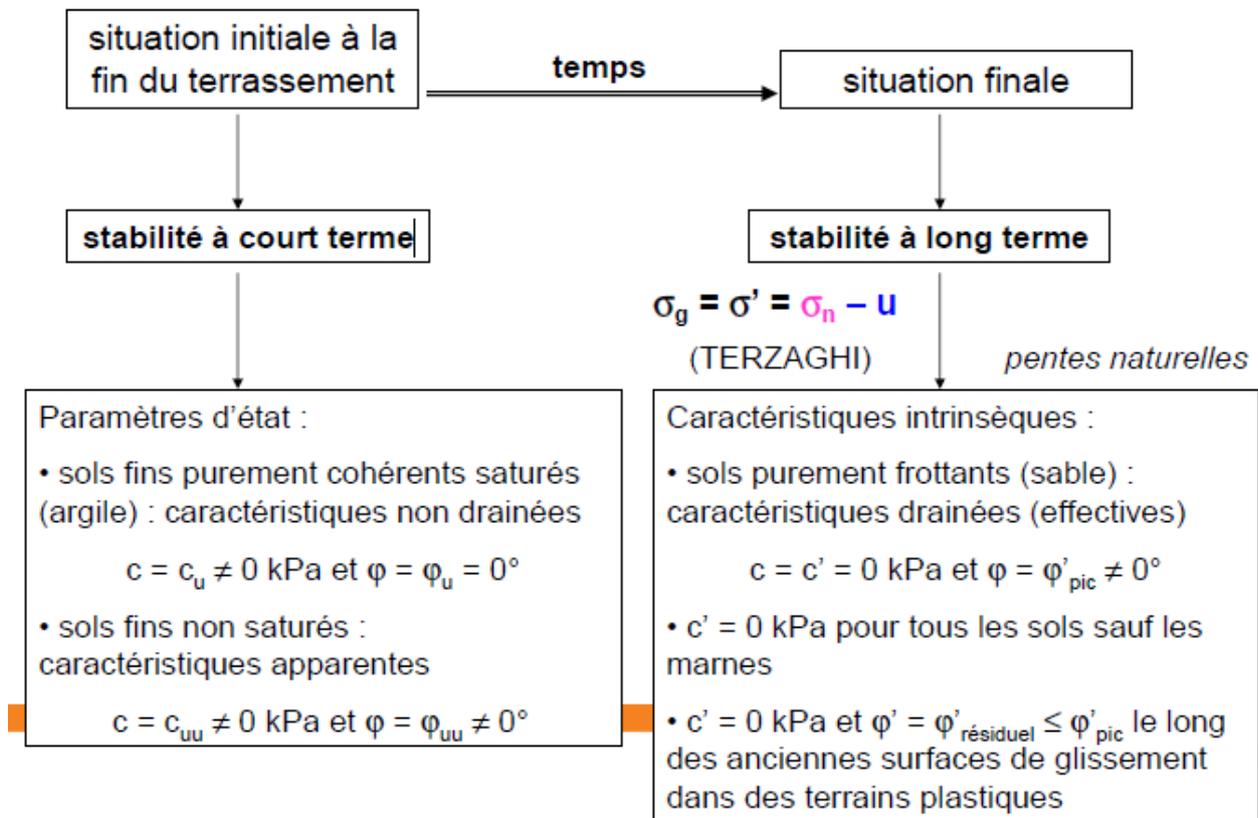


Figure II.02 : influence du facteur temps sur la stabilité [8]

III.2.2. Le fluage

Le fluage est caractérisé par des mouvements lents et continus, mais à des vitesses faibles. Dans le cas de fluage, il est difficile de mettre en évidence une surface de rupture. Le mouvement se produit généralement sans modification des efforts appliqués (contrairement aux glissements) : en fait, le matériau plus est sollicité à un état proche de la rupture. Ce type de mouvement peut: soit se stabiliser, soit évolué vers une rupture. [9]

III.2.3. La coulée de boue

Est un mouvement rapide d'une masse de matériaux remaniés, à forte teneur en eau et de consistance plus ou moins visqueuse. Elle prend fréquemment naissance dans la partie aval d'un glissement de terrain.

Phénomènes caractérisés par un transport de matériaux sous forme plus ou moins fluide. Les coulées ont lieu dans des formations argileuses, ou à granulométrie très fine (Marnes, schiste argileux, flysch argileux.....) fissurées ou saturées à plasticité moyenne. [10]



Photo II.02 : Chutes de blocs sur la RD 526 entre Mens et Clelles (Isère) Septembre 2001 [10]

III.3. Facteurs d'évolution et d'activation d'un glissement de terrain

Les glissements de terrain sont des phénomènes complexes, impliquant des principes multi-échelles et multi-physiques. Ils sont influencés par un grand nombre de facteurs, se divisant en quatre catégories :

- L'hygrométrie influence directement les propriétés mécaniques du sol, en fonction de sa porosité. C'est un facteur prépondérant, lors d'averses plus importantes, le nombre de glissements de terrain augmente. Une teneur en eau élevée affaiblira généralement les propriétés mécaniques de l'écoulement, accélérant son déclenchement ; des cycles répétés de chargement et de déchargement en eau amèneront de l'érosion. En période de gel l'eau occupe plus d'espace, générant des efforts internes importants ; le dégel modifie ensuite cet équilibre, et entraîne des déplacements plus ou moins importants. L'hygrométrie peut enfin avoir des origines humaines : à La Conchita, en Californie, une canalisation cassée a accéléré le déclenchement d'un glissement important.

- Le chargement mécanique de la pente peut-être modifié par la construction de structure ou par la fonte de glacier. Dans ce dernier cas, la modification du chargement combinée avec les infiltrations d'eau provoquées décuple les effets du glissement.

Une augmentation des charges en amont peut accélérer le glissement ; une diminution de la résistance en aval, lié à un décaissement par exemple, a des effets similaires. Il est crucial de bien connaître les zones à risque pour éviter d'y construire, ou de prendre des mesures pour s'assurer de ne pas déstabiliser une pente dangereuse. [11]

- L'exploitation humaine, la présence d'arbres ou de champs agricole peut venir stabiliser la pente, la déforestation peut perturber l'équilibre. Les herbes hautes plantées sur les dunes des littoraux stabilisent par leurs racines la couche supérieure et limitent l'exposition au vent.

-L'accidentel, des évènements extrêmes peuvent venir déstabiliser subitement un glissement en formation : des arbres stabilisateurs arrachés, une inondation sature et érode les sols, un séisme peut faire basculer un glissement ou entraîner la liquéfaction des sols.

Les facteurs de risque influençant l'évolution d'un mouvement de terrain ou le déclenchant sont multiples, et parfois difficiles à quantifier. Leur intégration dans des modèles de calcul exacts est donc souvent impossible. Cependant, même si les glissements sont des phénomènes complexes et très variés, il est possible d'en proposer en première approche une modélisation simple, qui éclaire sur les mécaniques mises en jeu et leur déroulement.

[11]

III.4.Effets et conséquences

Du fait des fissures, des déformations et des déplacements en masse, les glissements peuvent entraîner des dégâts importants aux constructions. Dans certains cas, ils peuvent provoquer leur ruine complète (formation d'une niche d'arrachement d'ampleur pluri métrique, poussée des terres incompatible avec la résistance mécanique de leur structure).

L'expérience montre que les accidents de personnes dûs aux glissements et coulées sont peu fréquents, mais possibles (cas d'un phénomène relativement rapide et/ou survenant de nuit, comme par exemple à la Salle en Beaumont en Isère en Janvier 1994 : 4 morts).

IV. méthodes d'analyse de stabilité des pentes

IV.1. Méthodes déterministes

Il est impossible de prédire avec précision la stabilité d'une pente. Un ingénieur géotechnicien expérimenté peut cependant établir une évaluation raisonnable d'un secteur en se basant sur une investigation complète des lieux. Ce genre de recherche exige une analyse des conditions du sol et de la nappe aquifère associée à une étude de la géologie locale, on examinera en particulier les pentes stables et instables existantes. [12]

L'analyse de la stabilité des pentes, par les méthodes d'équilibre limite, emploie des évaluations simples pour chaque valeur des variables dans les équations de stabilité. Les variables utilisées pour cette analyse sont les caractéristiques physiques et mécaniques du sol et la géométrie de la pente. Les hypothèses de base d'une telle approche peuvent être résumées en ce qui suit :

- Le modèle de comportement est celui de Mohr-Coulomb,
- La rupture se fait dans un plan (Analyse bidimensionnelle),
- Les forces considérées sont le poids et les surcharges,
- Le problème est statique,

CHAPITRE II : STABILITES DES PENTES

- On applique au sol les lois de la mécanique des milieux continus,
- Le déplacement du sol est rigide dans le cas des surfaces circulaires,
- La contrainte effective est égale à la contrainte effective moins la pression interstitielle (relation de Terzaghi)
- Le coefficient de sécurité du composant coésif de la force est égal à celui du frottement pour tous les sols,
- Le coefficient de sécurité est constant le long de la surface de rupture.

Plusieurs cas de figure de stabilité sont alors analysés :

- Rupture plane
 - Pentes finies
 - Pentes infinies (avec ou sans écoulement parallèle à l'inclinaison de la pente).
- [12]

IV.1.1. Stabilité des pentes en rupture plane

a) Pente finie :

Le coefficient de sécurité dans le cas de surface plane est traduit par la relation :

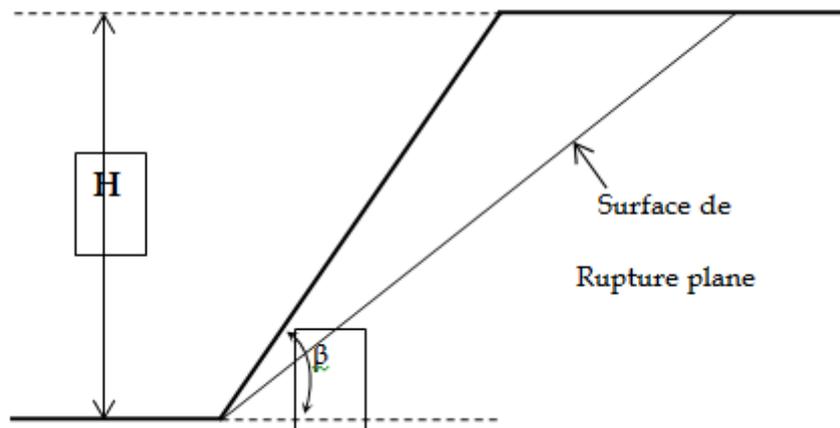


Figure II.03: Analyse d'un talus en rupture plane (pente finie) [12]

$$F = \frac{4c}{\gamma H} \left[\frac{\sin \beta \cdot \cos \phi}{1 - \cos(\beta - \phi)} \right]$$

b) Pente infinie

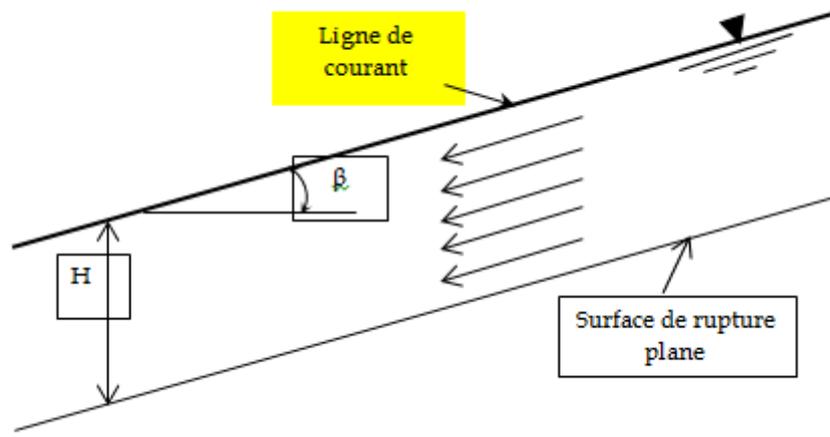


Figure II.04 : Analyse d'un talus en rupture plane (pente infinie) [12]

$$F = \frac{c}{\gamma_{sat} H \cos^2 \beta \cdot \tan \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{sat} \tan \beta}$$

IV.1.2. Stabilité des pentes en rupture circulaire ou quelconque

Cette stabilité peut être scindée en deux axes fondamentaux :

- Prise en compte de la totalité de la masse formant le sol dans l'étude d'équilibre et adaptation aux sols homogènes (Méthodes globales),
- Subdivision du massif en tranches verticales. La stabilité de chaque tranche est calculée séparément (Méthode des tranches). [12]

a) Méthode de Taylor (1937)

Cette méthode s'adapte aux pentes de géométrie simple formées d'un sol homogène sans présence d'eau. Il est considéré au niveau de la méthode les forces relatives au poids propre du massif, à la cohésion et à la résultante de la force normale et celle de frottement. La formulation du coefficient de sécurité $F = C / (\gamma \cdot H \cdot m_t)$

CHAPITRE II : STABILITES DES PENTES

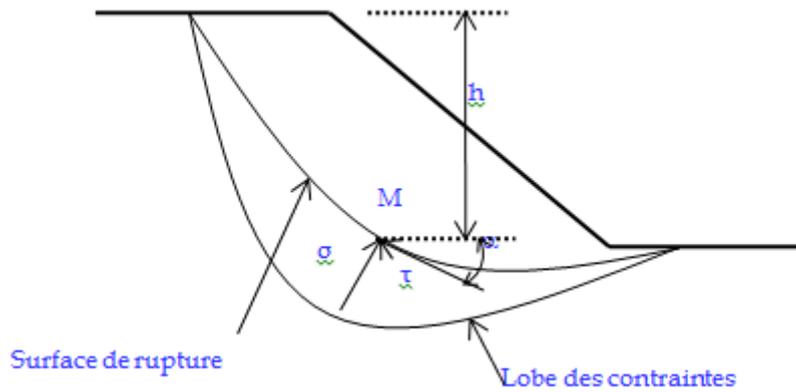


Figure II.06 : Schéma pour la méthode de perturbation [13]

c) Méthode des tranches

Le sol est divisé en plusieurs tranches verticales. Les différentes forces externes et internes qui s'appliquent sur chacune des tranches sont montrées sur la figure II.07.

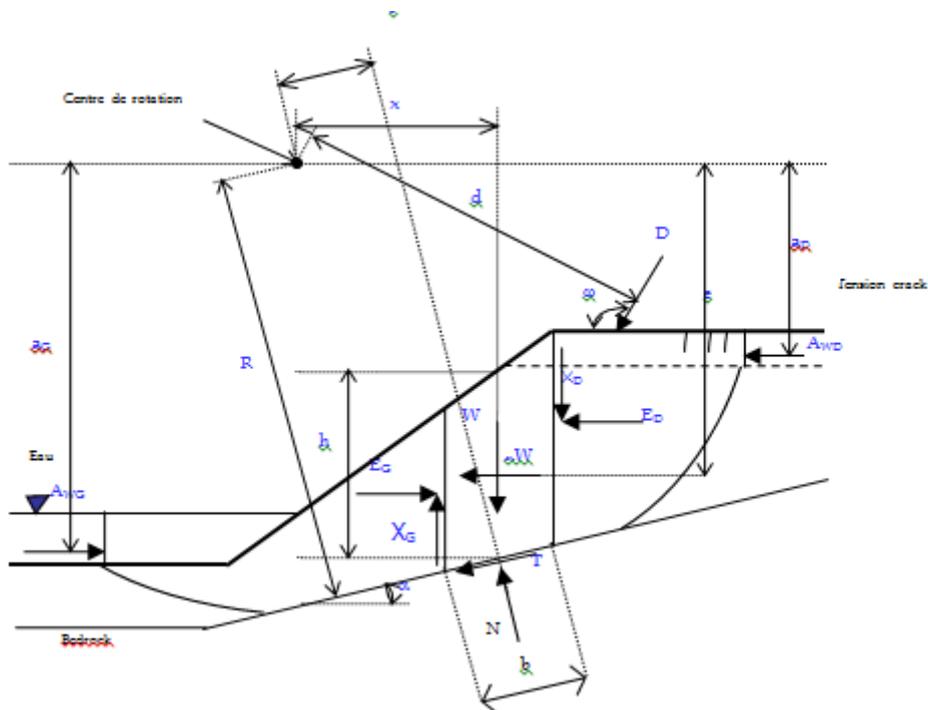


Figure II.07 : Forces considérées par la méthode des tranches [14]

CHAPITRE II : STABILITES DES PENTES

W = poids d'une tranche de largeur b et de hauteur h ;

N = force normale à la base de la tranche ;

T = force de cisaillement mobilisée sur la base de chaque tranche ;

ED= force inter-tranches horizontale normale du côté droit de la tranche ;

EG = force inter-tranches horizontale normale du côté gauche de la tranche ;

X = forces verticales inter-tranches de cisaillement ;

D = charge externe ;

KW = charge sismique horizontale appliquée au centre de la surface de chaque tranche ;

R = rayon pour une surface de glissement circulaire ou le bras de levier du moment associé à la force de cisaillement mobilisée T pour toute forme de surface de glissement ;

f = excentricité de la force normale au centre de la rotation ou au centre des moments ;

x = distance horizontale entre la ligne centrale de chaque tranche au centre de la rotation ou au centre des moments ;

e = distance verticale du centre de la surface de chaque tranche au centre de la rotation ou au centre des moments ;

d = distance de l'effort D au centre de la rotation ou au centre des moments ;

h = hauteur verticale moyenne de chaque tranche ;

a = distance perpendiculaire de la force latérale résultante de l'eau au centre de rotation ou au centre des moments ;

AW= forces latérales résultantes de l'eau ;

ω = angle entre l'effort D et l'horizontale ;

α = angle entre la tangente au centre de la base de chaque tranche et l'horizontale ;

b = largeur de la base de chaque tranche.

L'expression générale du coefficient de sécurité est représentée ainsi : **[14]**

$$F = F_m = \frac{\sum [c b \cos \alpha + (N - u_w b) \tan \phi \cos \alpha]}{\sum N \sin \alpha + \sum Kw - [D \cos \omega] \pm A_w}$$

- Méthode de FELLENIUS (1927)

Les hypothèses de cette méthode sont résumées ainsi :

- La surface de rupture est circulaire,

CHAPITRE II : STABILITES DES PENTES

- L'équilibre des moments est satisfait,
- L'équilibre des forces verticales est satisfait,
- L'équilibre des forces horizontales n'est pas satisfait,
- Les forces inter-tranches s'équilibrent totalement entre-elles.

L'expression du coefficient de sécurité est donnée par :

$$F = F_m = \frac{\sum [c b + (N - u_w b) \tan \phi]}{\sum W \sin \alpha}$$

- Méthode de BISHOP (1954)

Cette méthode d'article autour des mêmes hypothèses que celle de Fellenius en considérant les forces inter-tranches.

Le coefficient de sécurité est donné par l'expression suivante : **[14]**

$$F = F_m = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \cdot \sum \frac{[c b + (W + (X_D - X_G) - u_w b) \tan \phi]}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \frac{\tan \phi}{F}}$$

- Méthode de JAMBU(1956)

Les hypothèses de cette méthode sont :

- La surface de rupture est de forme quelconque,
- L'équilibre des forces est satisfait,
- Les forces inter-tranches sont négligées,
- Le lieu du point d'application des forces normales est fixé afin d'aboutir à l'équilibre des moments pour chaque tranche.

L'expression du coefficient de sécurité est :

$$F = \frac{1}{\sum W \tan \alpha} \cdot \sum \frac{[c b + (W - u_w b) \tan \phi]}{(\cos \alpha) \left(\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \frac{\tan \phi}{F} \right)}$$

- Méthode de BISHOP et MORGENSTERN(1960)

Cette méthode est basée sur le développement de tableaux pour le calcul du coefficient de sécurité des pentes homogènes avec présence d'eau. **[15]**

Les paramètres principaux considérés pour la détermination du coefficient de sécurité sont :

- Distance verticale du centre de la base au centre de la ligne de saturation de chaque tranche
- Coefficients de stabilité qui dépendent de la géométrie de la pente et des propriétés du sol. [15]

- Méthode de MORGENSTERN et PRICE(1965)

Cette méthode s'applique à toute forme de surface de rupture, satisfait toutes les conditions d'équilibre et les forces inter-tranches sont prises en compte. La force de cisaillement inter-tranches peut être évaluée par un pourcentage de la force normale inter-tranches selon l'équation empirique de Morgenstern-Price suivante :

$$X = E \cdot \lambda \cdot f(x)$$

Avec : λ = le pourcentage (en forme décimale) de la fonction utilisée ;

$F(x)$ = la fonction de la force inter-tranches représentant la direction relative de la force résultante inter-tranches

- Méthode de SPENCER(1967)

Tenant compte de tous les paramètres des autres méthodes, SPENCER a établi des abaques donnant l'angle de frottement Φ_d en fonction de la géométrie de la pente, des propriétés du sol, du constant $r_u = (u_w/\gamma \cdot h)$ et une valeur initiale du coefficient de sécurité. Ensuite F est calculé par la formule $F = (\tan \Phi / \tan \Phi_d)$ jusqu'à convergence. [15]

- Méthode générale d'équilibre limite (1970)

Cette méthode est similaire à celle de Morgenstern-Price, la différence réside dans la prise en compte du calcul de différentes valeurs du coefficient de sécurité pour différentes valeurs de λ . Il y a lieu de représenter la variation du coefficient de sécurité en fonction de λ . L'intersection des deux représentations graphiques de F_m et F_i en fonction de λ permet de garantir l'équilibre des moments et des forces.

IV.2. Méthodes probabilistes

Il y a lieu de signaler que les méthodes d'équilibre limite ne considèrent pas l'ensemble des incertitudes sur les paramètres du problème à résoudre, notamment les données géométriques, et les erreurs de mesure au laboratoire des caractéristiques mécaniques du sol et leur variation spatiale et temporelle sur le terrain.

Compte tenu de l'aspect plus ou moins aléatoire des paramètres d'analyse, des méthodes probabilistes, basées spécialement sur le calcul de risque ont été développés.

Il faut cependant ajuster la variation de chaque paramètre influençant d'une manière significative la stabilité à une loi probabiliste et de calculer la fonction probabilité de rupture comme étant une combinaison de plusieurs fonctions aléatoires.

On synthétise dans ce qui suit quelques méthodes probabilistes :

- Simulation Monte-carlo

Cette méthode est basée sur l'identification d'un modèle déterministe avec introduction des variables multiples pour l'estimation les résultats en une simple valeur. La distribution de probabilité pour chaque variable est établie pour le modèle de simulation. On obtient ainsi la distribution de probabilité du paramètre de sortie.

- Evaluation de la fiabilité

Au niveau de cette méthode, les résultats de l'analyse de stabilité de pentes est assimilé à une distribution du coefficient de sécurité ou de la hauteur critique.

- Analyse statistique

Dans le cas de l'étude de stabilité des pentes, l'analyse statistique peut être d'une grande contribution. Il y a lieu de déterminer les paramètres statistiques notamment la moyenne, l'écart type, la fonction de densité de probabilité et la fonction de distribution de probabilité. La variation des coefficients de sécurité peuvent être représentées respectivement par rapport aux fréquences ainsi qu'aux probabilités.

Certains chercheurs se sont penchés sur l'approche probabiliste est mettant en évidence :

- Le non unicité de la relation entre le coefficient de sécurité et la probabilité de rupture,
- La prise en charge de la troisième dimension qui conditionne la probabilité de rupture.
- La considération d'une approche probabiliste en considérant comme paramètres prépondérants la cohésion et l'angle de frottement interne. **[12]**

- Analyse de la stabilité des pentes par approche stochastique

Les approches stochastiques d'analyse de stabilité peuvent être adoptées en considérant les variables d'entrée comme des variables aléatoires ou des fonctions aléatoires. Ainsi le résultat final, c'est à dire le coefficient de sécurité correspond à une variable aléatoire dépendante. Cette variable a une fonction de distribution statistique avec une espérance mathématique et une variance.

IV.3. Méthodes numériques

Le développement des programmes sur ordinateurs a été très bénéfique pour la résolution de certains problèmes de stabilité des pentes. Beaucoup de méthodes numériques sont utilisées pour le faire en l'occurrence :

-Méthode des éléments finis, permettant de modéliser les aspects liés à l'hétérogénéité des matériaux, la géométrie des talus et leur environnement, l'interaction entre les terrains et les structures ainsi que les discontinuités spécifiquement pour les massifs rocheux.

-Méthode des différences finies, dans laquelle les variables ne sont définies qu'aux nœuds du maillage et la résolution est locale et pas à pas. Le code de calcul utilisé au niveau de ce mini-projet se base essentiellement sur cette méthode.

-Méthode des éléments distincts, qui se base sur les principes de la méthode des différences finies tout en tenant compte de la discontinuité du milieu étudié.

Toutefois, les méthodes numériques ont permis de faire de grands progrès dans la compréhension des divers types de comportement des talus.

V. Techniques de stabilisation

Critères de choix d'une méthode de stabilisation assurant une augmentation de 20 à 30 % de la sécurité :

- paramètres techniques du site

- objectif : arrêter ou ralentir un glissement en cours, arrêter une partie d'un glissement en cours, empêcher un glissement d'endommager des infrastructures (à titre curatif), prévenir un mouvement potentiel (à titre préventif) impératifs technico-économique techniques les plus couramment utilisées :

- terrassements (actions sur la pente moyenne du terrain)
- drainage (actions sur l'eau)
- introduction d'éléments résistants (soutènements, ancrages)
- protection passive et surveillance

⇒ Une solution sûre : éviter la zone des désordres (si possible) par une déviation de la route ou une dérivation de la rivière. **[8]**

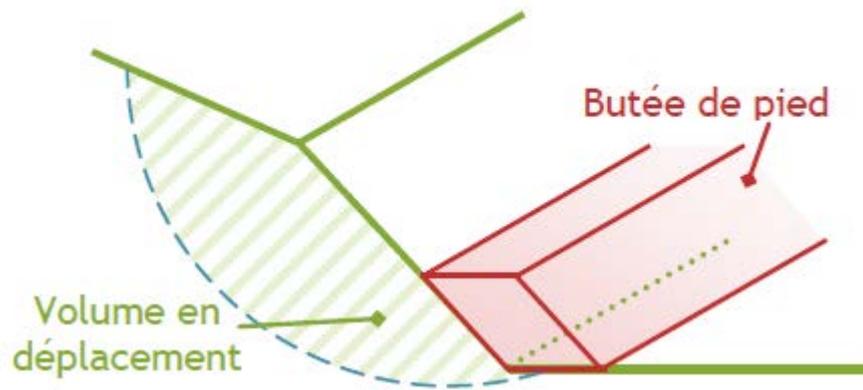
V.1) Terrassements

V.1.1) Remblai de pied :

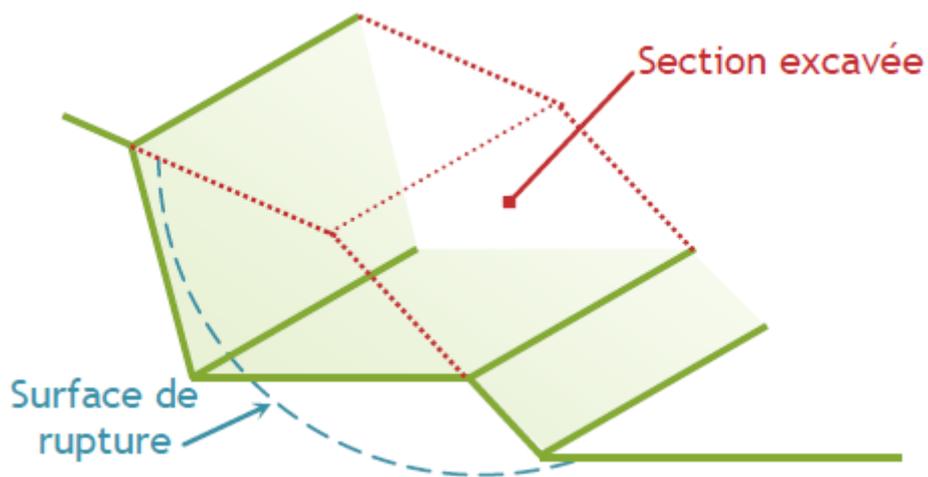
Le chargement en pied du glissement contrebalance les forces motrices du volume en mouvement (FigureII.8).

V.1.2) Allègement en tête :

Terrasser la tête du glissement allège la masse du volume en mouvement, et donc diminue les forces motrices (FigureII.9). **[11]**



Figurell.8 : Principe du remblai de pied [11]



Figurell.9 : Principe de l'allégement en tête [11]

V.1.3) Purge et reprofilage

(Adoucissement de la pente, risberme)

V.1.4) Substitutions partielles ou totales par des matériaux de bonne qualité de carrière

Bêches, contreforts, éperons, masque. [8]

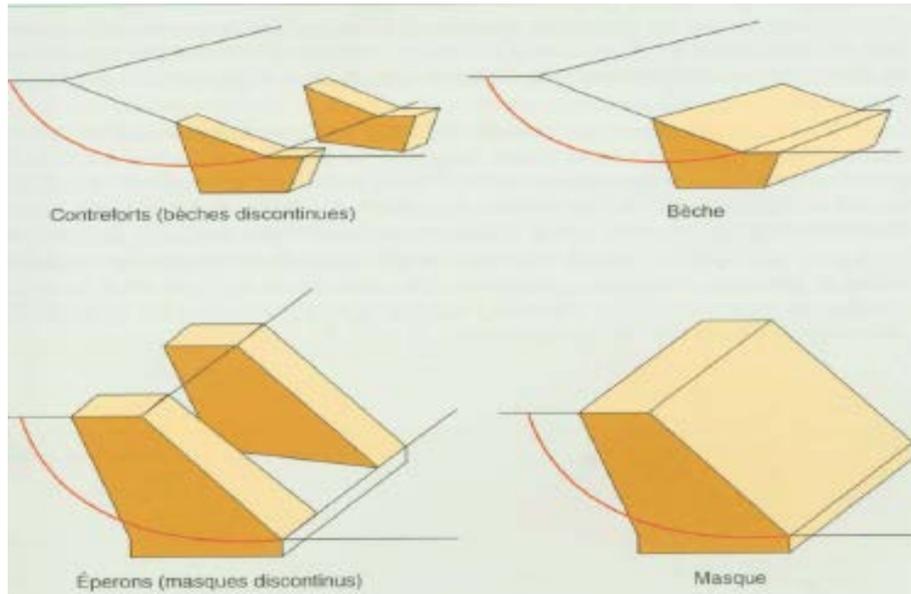


Figure II.10 : Principales techniques de stabilisation des talus de déblai [8]

V.2) Techniques courantes de drainage

L'eau a fréquemment un rôle moteur dans les glissements de terrain, l'objectif du drainage est de contrôler la teneur en eau du sol et de réduire les pressions interstitielles au niveau de la surface de rupture. Le drainage peut évacuer l'eau de la zone ou encore éviter l'alimentation en eau de la zone par collecte et canalisation des eaux de surface. [11]

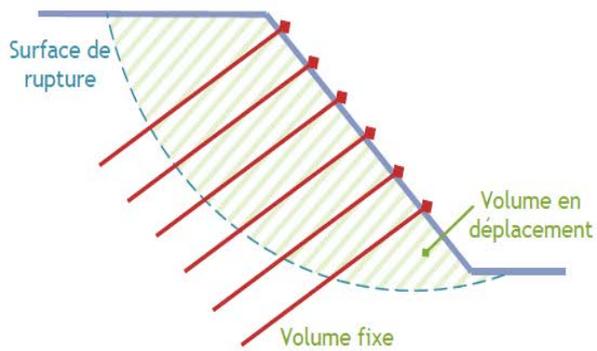
Bien caractériser les nappes pour l'étude de la faisabilité économique et technique des dispositifs de drainage (implantation, profondeur à atteindre, perméabilité des terrains, pérennité des dispositifs, etc.)

- Drainage superficiel : collecte et canalisation des eaux de surface vers un exutoire hors glissement, imperméabilisation des fossés et des accotements _ non infiltration du ruissellement superficiel
- Drainage profond : le choix d'une technique dépend de la nature des terrains et de l'objectif à atteindre (en phase chantier ou exploitation)
- tranchées drainantes (+ drains agricoles, géodrains, parois drainantes). [8]

V.3) Introduction d'éléments résistants

Le rôle de ces systèmes est d'armer la terre et de limiter son mouvement.

Le clouage : Ce dispositif transfère par un système d'accrochage (pieux, clous) les efforts du volume en mouvement vers le volume fixe (figure II.11).



Figurell.11 : Principe du clouage et exemple de réalisation, image SIMPRO [11]

Le soutènement : C'est un écran rigide ou souple qui bloque le volume en mouvement. Rigide, les efforts mis en jeu sont importants et peuvent amener à la rupture. [11]

Ouvrages de soutènement : paroi berlinoise (ouvrage composite constitué de poteaux verticaux et d'un écran de soutènement. [6]



Photo II.3 : Paroi berlinoise (profilés métalliques) soutenant le cimetière marin de Varengé ville-sur-Mer. [6]

V.4) Protection passive et surveillance (mise en œuvre impossible de techniques de stabilisation)



Photo II.4 : Exemple des Ruines de Séchilienne : 2 déviations de l'ex-RN91, merlon de protection, dérivation de la Romanche, travaux d'aménagement hydraulique, plan de secours, expropriations.

Les méthodes de prévision sont encore loin d'être satisfaisantes, même pour des sites bien instrumentées :

- modélisation complexe de l'ensemble des phénomènes en présence
- quantification de l'influence de chaque facteur
- connaissance des apports d'eau réels au massif (alimentations latérales, lointaines et différées)
- dérive progressive liée à l'évolution plus ou moins rapide du système (nécessité d'actualisations régulières)
- quantité et fiabilité des mesures disponibles
- la vitesse de certains mouvements ne dépend pas principalement des conditions hydrauliques.

VI. Conclusion:

Parfois, il est possible de déclencher un glissement de façon précoce pour mieux le contrôler, ou de construire des infrastructures assurant que son déclenchement n'aura pas de conséquences catastrophiques. Le problème est que, le plus souvent, l'établissement d'une réponse face à un risque de mouvement prend des mois et demande les connaissances de dizaines d'ingénieurs ; le coût financier est donc très important. Il n'existe pas réellement à l'heure actuelle de solution générale au contrôle des glissements de terrain.

Chapitre III : Les évacuateurs de crue des barrages en terre

I. Introduction

L'évacuateur de crue (l'EVC) est un organe essentiel pour la sécurité du barrage en permettant l'évacuation de crues donnant lieu à des niveaux supérieurs à la retenue normale et permettant aussi la dissipation de l'énergie.

Cet ouvrage consiste en un seuil calé à la côte de retenue normale qui peut être implanté sur la partie centrale pour les barrages rigides.

Pour un barrage en remblai, il est implanté en rive ou, si la géologie ou la topographie des rives ne le permet pas, en tulipe.

II. Catégories des évacuateurs de crue

Les évacuateurs de crues sont des ouvrages annexes aux barrages, qui permettent la restitution des débits de crues excédentaires (non stockés dans le réservoir) à l'aval du barrage. D'une importance primordiale pour la sécurité du barrage, les évacuateurs doivent être en mesure d'empêcher le débordement de l'eau par-dessus la digue et l'apparition de phénomènes d'érosion à l'aval de la digue dans la zone de rejet dans l'oued. Les déversoirs peuvent être groupés en deux principaux types : les déversoirs de surface et les déversoirs en charge. [17]

II.1. Déversoir de surface

Il s'agit du type le plus communément utilisé et aussi le plus fiable. L'évacuateur de surface débute par un seuil. Ce seuil dans un chenal à faible pente qui amène l'eau à l'aval de la digue. L'eau emprunte ensuite le coursier dont la pente permet de rattraper la différence de cote entre le niveau de la retenue et celui de l'oued à l'aval. Le coursier aboutit soit directement dans l'oued (différence de cote faible), soit dans un bassin d'amortissement (cas de forte pente). L'évacuateur de surface est placé soit : latéralement à l'axe du barrage sur une rive, ou parallèlement à l'axe du barrage.

II.1.1. Evacuateur latéral

Le déversoir du type latéral est adopté dans le cas où la pente du versant est faible. Ce type d'ouvrage repose directement sur le sol pas soumis à des tassements sous l'effet du massif du barrage (photo III.01). L'écoulement dans le coursier est parallèle au seuil (latéralement à l'axe du barrage sur une rive). Si la pente du versant est forte, un déversoir latéral conduit à des déblais important et un déversoir frontal est alors préférable. Ce type de déversoir est

également utilisé dans le cas de débit évacué très important conduisant à une longueur du seuil très important. [17]



Photos III.01 : Evacuateur de crues à déversoir latéral [17]

II.1.2. Evacuateur frontal

Le déversoir de type frontal est adopté par des pentes du versant fortes. L'écoulement dans le coursier est perpendiculaire au seuil.



Photos III.2 : Evacuateurs de crues à déversoir frontal [17]

II.1.3. Evacuateurs portés par les barrages

Pour les barrages poids BCV ou BCR et à moindre degré voûtes et contreforts, les évacuateurs peuvent être incorporés au niveau du corps du barrage, on parle alors d'évacuateurs portés. Ces derniers s'adaptent convenablement aux barrages poids. Néanmoins pour les barrages voûtes, l'incorporation est plus ou moins difficile et posé souvent des contraintes d'ordre technique ou économique [17].



Photos III.03 : Evacuateurs de crues portés par les barrages [17]

II.2. Evacuateur en charge

Ils peuvent être du type puits ou type siphon.

II.2.1. Evacuateur en puits

L'évacuateur en puits est un ouvrage en béton de forme circulaire (difficultés d'implantation sur corps du barrage ou rives, difficultés techniques ou financières). Il évacue l'eau par chute verticale dans la conduite enterrée débouchant à l'aval de la digue dans un bassin de dissipation. Le puits peut servir également de tour de prise d'eau. La conduite d'évacuation joue le rôle de conduite de vidange [17].

Pour ce type d'évacuateur, il est nécessaire d'insister sur trois aspects importants :

- La longueur déversant à considérer est égale au périmètre du déversoir,
- La convergence des filets à l'intérieur du centre du puits,
- Le noyage sur la partie basse de puits [18].



Photos III.04 : Evacuateurs de crues en puits [17]

II.2.2. Evacuateur en siphon

Les siphons constituent des évacuateurs de superficie capables d'évacuer de très forts débits sous de faibles décrets pour un encombrement restreint (chose souhaitable pour toute conception optimale des organes d'évacuation). Bien que la théorie du "siphon évacuateur" soit connue depuis longtemps, les projeteurs hésitent encore à employer des siphons, leurs préjugés défavorables pouvant se résumer en quatre points :

- Manque de capacité de surcharge,
- Manque de souplesse, puisqu'ils fonctionnent (par tout ou rien),
- Incertitude d'un amorçage sûr, ce dernier pouvant être empêché par le gel, les corps flottants, les entrées d'air,...ect,

CHAPITRE III : LES EVACUATEURS DE CRUE DES BARRAGE EN TERRE

- Exécution délicate, par suite de l'importance des vibrations et des efforts dynamiques auxquels ils sont soumis [19].



Photos III.05 : Evacuateurs de crues en siphon [19]

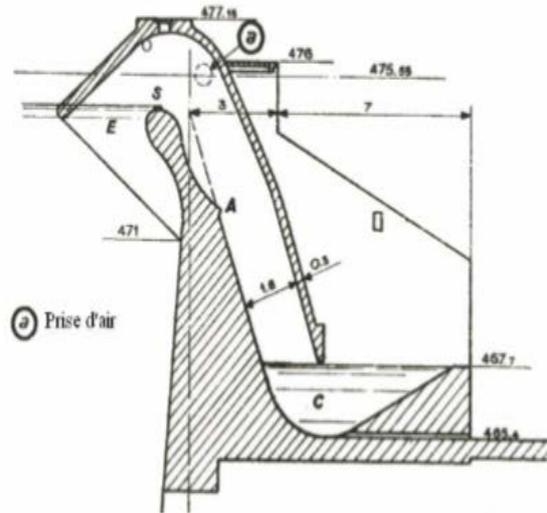


Figure III.01 : Evacuateurs de crues en siphon [19]

II.3. Evacuateur de surface à seuil mobile

Lorsque le site ne se prête pas à l'établissement d'un barrage réservoir fixe, un barrage mobile peut être adopté. Les éléments mobiles assurent la régulation du niveau de la retenue en fonction des variations du débit pour assurer l'alimentation de prises d'eau [20].



Photos III.06 : Barrages mobiles [20]

II.4. Evacuateur vannées

Il existe une grande variété de vannes mobiles, de nombreux critères peuvent être adoptés pour les classer, à savoir :

- En fonction de la disposition des pertuis : vannes de surface et de profondeur,

CHAPITRE III : LES EVACUATEURS DE CRUE DES BARRAGE EN TERRE

- Par rapport à la destination d'exploitation : des vannes principales, batardeau, vannes de secours et celles de constructions, remarquons à la fois qu'on tend à employer les mêmes vannes pour des diverses destinations,
- D'après les matériaux principaux : métalliques, en béton armé, en bois, bien sûr les vannes métalliques sont les plus répandues dans le monde,
- Le mode d'appui : certaines vannes sont simplement appuyées sur les culées ou les piles, d'autres sur le seuil de l'ouvrage,
- Le mode de déplacement : il existe des vannes le vantées ou plongeantes, des vannes roulantes, des vannes rotatives, des vannes à plusieurs axes de rotations, etc,
- Le mode de manœuvre : on a des vannes à manœuvre manuelle, mécanique ou automatique [21].

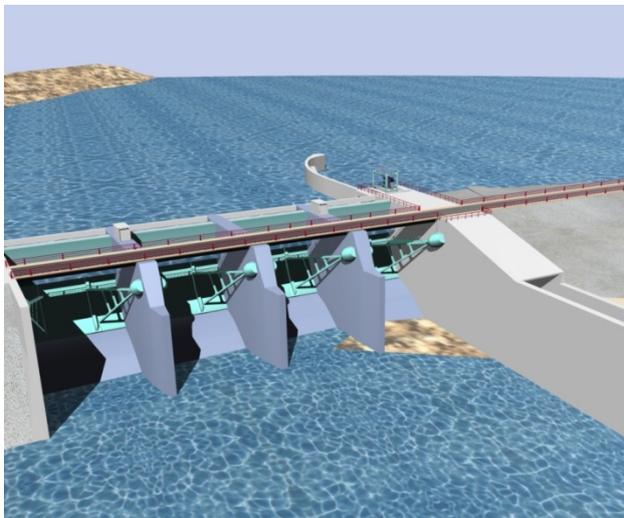


Figure III.02 : Evacuateurs vannés [21]



Photos III.07 : Evacuateurs vannés [21]

II.5. Evacuateur de crue à hausses fusibles

Le déversoir en hausse fusible a été inventé en 1989 par François Lempérière. Ce système est l'équivalent d'un tampon fusible, semblable à des hausses multiples placées sur la crête de déversoir. Elles ont la forme d'un déversoir en labyrinthe dans lequel chaque hausse représente un cycle du labyrinthe [22].

Les hausses fusibles sont des modules indépendants, juxtaposés sur le seuil du déversoir d'un barrage. Grâce à un système de puits réglés à différents niveaux, les hausses fusibles s'effacent progressivement pour des crues très exceptionnelles.

En conditions normales, les hausses augmentent la capacité de stockage du réservoir. Pour toutes les crues inférieures à la crue de déclenchement, dont la valeur est généralement

pour des crues de période de retour bien supérieure à 100 ans, les hausses agissent comme un seuil libre déversant.



Photos III.08 : Evacuateurs à hausses fusibles [22]

II.6. Evacuateur à faible charge

L'évacuateur à faible charge (bec de canard) est constitué d'un seuil présentant une partie curviligne, généralement semi-circulaire, et deux parties rectilignes de chaque côté. Mais, pour simplifier la mise en œuvre, on peut aussi concevoir des seuils qui se développent en plan selon trois côtés d'un rectangle allongé [23].



Photos III.09 : Evacuateurs à faible charge [23].

III. Les évacuateurs de crues des petits barrages

Pour les petits barrages, l'évacuateur de crues consiste très souvent en un chenal (ou coursier) avec seuil déversant (ou déversoir) libre à l'amont et dissipateur d'énergie à l'aval, en fond de vallée. Pour certains barrages, les plus grands, il peut s'avérer plus économique d'adopter la solution de la tour au pied amont raccordée à une galerie sous le remblai, ce qui permet, en compartimentant cet ouvrage, d'assurer les trois fonctions suivantes : évacuateur en puits (ou en tulipe), prise d'eau à différents niveaux et vidange de fond. [24].

III.1. Conception du seuil déversant

Pour un débit donné, il y a une infinité de solutions entre :

- * un déversoir très long entraînant une charge hydraulique très faible ;
- * un déversoir très court avec une charge hydraulique importante. Le principe général consiste à faire une hypothèse de longueur déversant, à calculer la charge sur le déversoir en tenant compte du laminage dans la retenue puis éventuellement à revoir à la hausse ou à la baisse la longueur du déversoir. On retient une charge maximale sur le déversoir de 0,50 à 3 mètres, plus généralement de 1 à 2 mètres.

III.2. Entonnement frontal ou latéral pour un évacuateur rectiligne

Dans le cas d'un évacuateur de surface, l'entonnement est dit « frontal » si le sens de l'écoulement est amont-aval au droit du déversoir et il est dit « latéral » si l'écoulement change de direction à 90° au droit du déversoir. Lorsque la retenue a une grande surface, elle permet de bénéficier d'un bon laminage ; il est alors intéressant d'avoir le plus de volume stocké transitoirement, donc la charge la plus forte, donc la longueur déversante la plus faible. Dans ce cas, l'entonnement est plus généralement de type frontal. A contrario, une grande longueur déversant permet de diminuer la surface des acquisitions foncières puisque le niveau des plus hautes eaux est moins élevé. Le coût du remblai est alors moins important puisque la crête est moins haute, mais le coût de l'évacuateur est bien sûr augmenté. La revanche apporte une sécurité plus élevée vis-à-vis d'une crue supérieure à la crue de projet. L'entonnement est plus généralement de type latéral, ce qui permet souvent de réduire les terrassements.

III.3. Implantation et dimensionnement

L'évacuateur de surface est habituellement réalisé sur l'un des deux appuis, car il repose alors sur du matériau en place peu susceptible de tasser. On choisit, soit l'appui qui permet

le trajet le plus court pour atteindre l'aval du barrage, soit l'appui le plus rigide qui constituera la meilleure fondation, soit l'appui le moins raide pour diminuer les difficultés de terrassement. Dans le cas de vallées très évasées et symétriques, le trajet est néanmoins très long. D'où l'idée de poser l'évacuateur sur le remblai au droit du thalweg. Pour des remblais de faible hauteur, bien compactés et lorsque la fondation est peu compressible, cette solution s'avère bien adaptée. L'ouvrage en béton, réalisé avec des joints articulés, absorbe sans dommage les faibles tassements observés. Une telle conception est maintenant classique pour des barrages jusqu'à environ 20 mètres de hauteur, et même plus, à condition que la longueur du seuil déversant ne dépasse pas environ 15 mètres, pour éviter des joints de construction dans le sens rive à rive. Il n'est cependant pas interdit d'avoir un joint longitudinal, mais l'ouvrage devient plus complexe. [24].

IV. Impact des terrassements dans la zone des évacuateurs de crues des barrages en terre

Les glissements de terrain se produisent sous l'action d'un (ou plusieurs) " facteur déclenchant, qui rompt l'équilibre, soit au niveau des forces massiques, soit au niveau des forces extérieures, ou au niveau des forces de liaison dans le massif. Certains de ces facteurs déclenchant sont naturels, tels que séismes, érosions, fluctuation des écoulements hydrauliques, altération, etc. A l'échelle des travaux de génie civil, l'activité humaine s'ajoute à ces facteurs naturels et constitue fréquemment un facteur essentiel dans la rupture de l'équilibre des massifs. Du seul point de vue du rôle de l'activité humaine le sujet à traiter est très vaste, puisqu'il couvre des matériaux très divers, des argiles molles aux massifs rocheux, et des ouvrages très variés (barrages, ports, bâtiments, infrastructures, etc.)

Lorsque le facteur d'instabilité est une modification d'ordre géométrique (tranchée de déblai, remblais) ce sont les composantes \hat{u} et r de la contrainte qui sont affectées, ainsi que, dans le cas des sols fins peu perméables, la valeur u de la pression interstitielle (apparition de surpressions positives ou négatives).

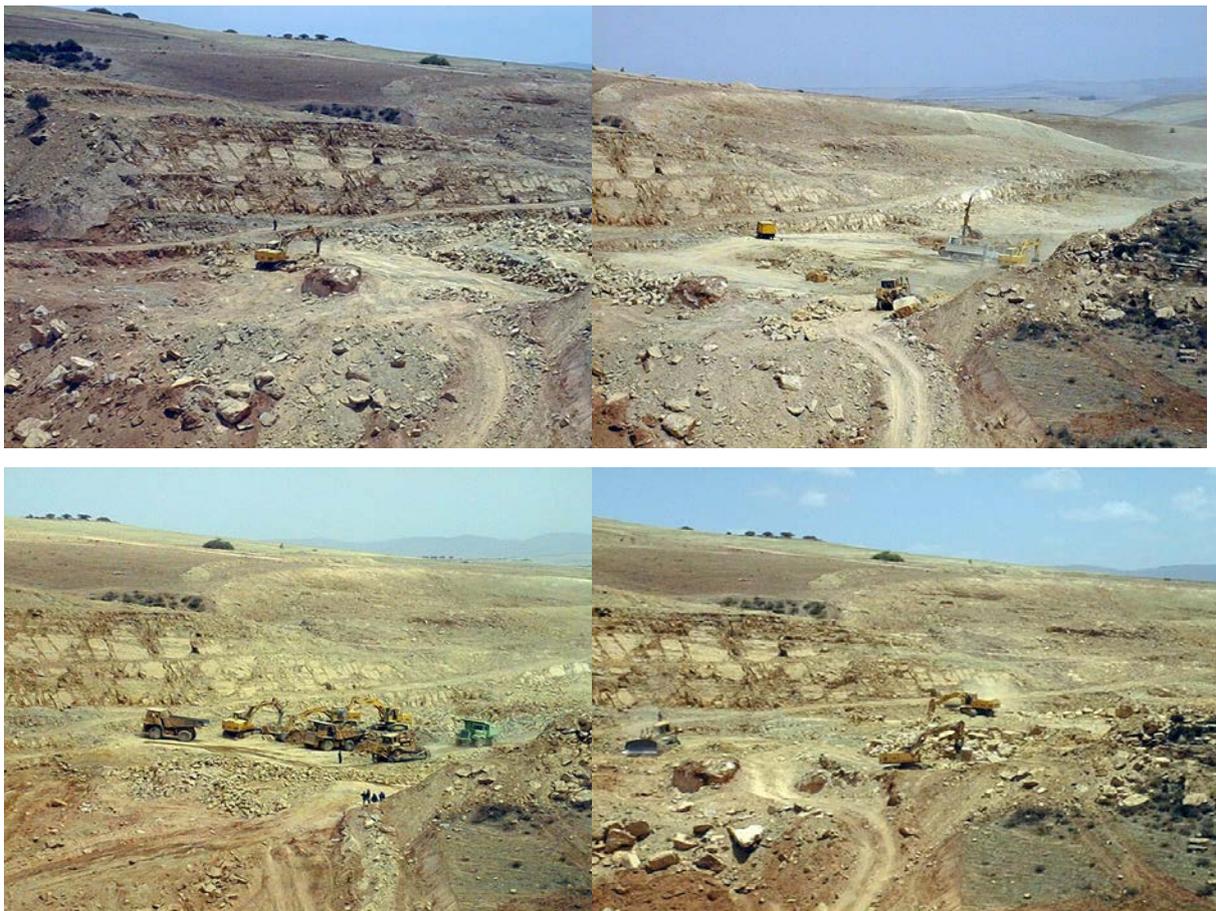
Etant implantés sur l'une des rives du barrage, les évacuateurs de surface des petits barrages en terre nécessitent des terrassements importants. Ce sont des terrassements en grandes

CHAPITRE III : LES EVACUATEURS DE CRUE DES BARRAGE EN TERRE

masse et en tranchées souvent profondes (2 à 10 m) et sur une largeur aussi importante (5-20 m).

Les petits barrages, souvent érigés dans des zones marneuse ou argileuse (Utilisation des matériaux locaux pour la construction de barrages homogènes ou à noyaux centraux) nécessitent une attention particulière quant aux terrassements de leurs évacuateurs de crues. La chronologie des travaux exige le lancement des différents lots en même temps (terrassements, remblais, et génie civil).

Les terrassements des évacuateurs de petits barrages, implantés au niveau des flancs des rives, notamment argileux, peuvent causés des préjudices importants par rapport à la stabilité des versants (suppression des butées), particulièrement à grande hauteur. La cadence des travaux exigée, la chronologie conjuguée des travaux entre les remblais du barrage et ceux de l'évacuateur de crue et la nature instable des versants sont des paramètres capitaux à intégrer, d'une manière solidaire pour les décisions à prendre.



Photos III.10 : Types de terrassements pour évacuateurs de surface des barrages en terre Barrage SIKKAK, Wilaya de Tlemcen

V. Conclusion :

L'évacuateur a pour objectif de faire transiter le débit de la crue de projet. Il doit ainsi rester libre de tout obstacle et notamment de colmatage des seuils par des branches ou des arbres ou d'obstructions du coursier par chute de pierres ou glissement de terrain. Dans ce dernier cas, si le désordre se produit près de l'extrémité amont du coursier, il y a un risque important d'envoie du déversoir et donc de dépassement de la cote PHE ; s'il se produit suffisamment en aval, les conditions d'écoulement au déversoir reste inchangées mais un débordement du coursier peut provoquer une érosion dommageable pour l'appui du barrage ou pour le parement aval.

Si l'aptitude de l'évacuateur à faire transiter le débit de la crue de projet est un élément déterminant pour sa sécurité, l'expérience montre que d'autres critères peuvent influencer :

- mauvaise connaissance des niveaux de la retenue et des débitances des vannes ;
- défauts liés à une mauvaise conception du génie civil ;
- maintenance et surveillance défectueuse des parties génie civil ;
- sur les évacuateurs vannés : manque de fiabilité des alimentations électriques et défauts de maintenance des parties mécaniques et électriques ;
- consignes de crues défectueuses entraînant une arrivée tardive de l'exploitant, des manœuvres de vannes inadaptées.

En cas d'augmentation de la lame déversant suite à la révision de la crue exceptionnelle, il convient de vérifier si le profil est toujours adapté et ne risque pas d'engendrer des désordres dans l'ouvrage (vibration, cavitation, mise en dépression des radiers et coursiers...).

**Chapitre IV : Analyse de la
stabilité de la rive gauche du
Petit barrage de "Tamellahet"**

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

I. Introduction :

Le barrage de Tamallahet est un barrage en terre à noyau central d'une hauteur, hors fondations, de 17 m. L'ouvrage d'évacuation des crues est de type de surface à entonnement latéral. Il est implanté sur la rive gauche. Le relief en rive gauche est accidenté et enregistre d'importantes hauteurs par rapport à la rive droite où les élévations sont moins prononcées. Un important versant surplombe l'ouvrage d'évacuation des crues. Au niveau des investigations géotechniques initiales ou complémentaire, aucune étude n'a été engagée en vue de définir l'action des mouvements de terrain et des terrassements sur la stabilité des versants, notamment celui de la rive gauche.

Les terrassements en grande masse effectués dans la zone de l'évacuateur de crues (Environ 40 000 m³ de déblais) ont provoqués des glissements et escarpements du talus à forte pente. Ce mouvement a été aussi accompagné par l'apparition d'importantes fissures de surface.

Initialement, la pente du talus naturel était de 16 à 18%. Après terrassement, la pente obtenue est d'environ 110% (angle de pente 47°). L'inclinaison du talus étant largement supérieure aux valeurs des angles de frottements des sols constituant le talus, le glissement n'a pas pu être évité. [25]

II. Opportunité et consistance du travail

Le présent projet de fin d'étude vise donc une analyse de la stabilité du versant gauche du barrage en illustrant, d'une part, l'influence des terrassements sur la stabilité au glissement de la zone de l'évacuateur de crues, ainsi que des règles de chronologie des travaux au niveau de la conjugaison remblais de la digue-évacuateur de crues. Le travail est mené grâce à la modélisation numérique.

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes d'éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses rend le passage de la réalité au modèle est difficile à réaliser. Des outils de modélisation performants nous permettent le passage d'un projet réel complexe au modèle numérique et de faire l'étude paramétrique facilement et rapidement. On utilise souvent plusieurs modèles de comportements qui dépendent de la nature du sol et du type d'ouvrage.

Les différents cas de figure traités au niveau du présent mémoire se résument ainsi :

Cas N° 01 : Analyse de la stabilité du versant à profil naturel,

Cas N° 02 : Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue,

Cas N° 03 : Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue et conjugaison des remblais de la digue à la côte retenue normale

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

Cas N° 04: Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue et conjugaison des remblais de la digue à la côte crête

Cas N° 05 : Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue combinés à un reprofilage, par anticipation, du profil naturel du versant gauche.

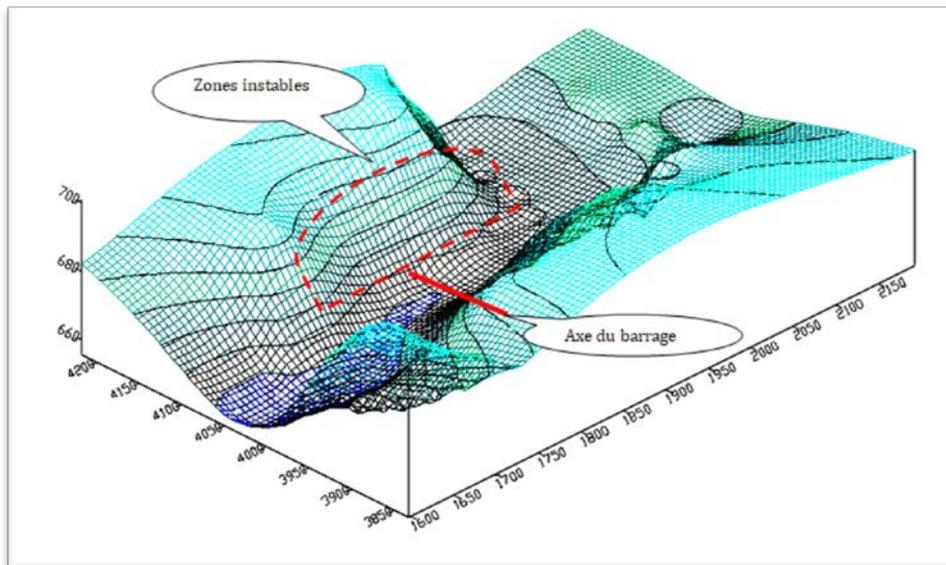


Figure IV.01 : configuration topographique du versant gauche [25]

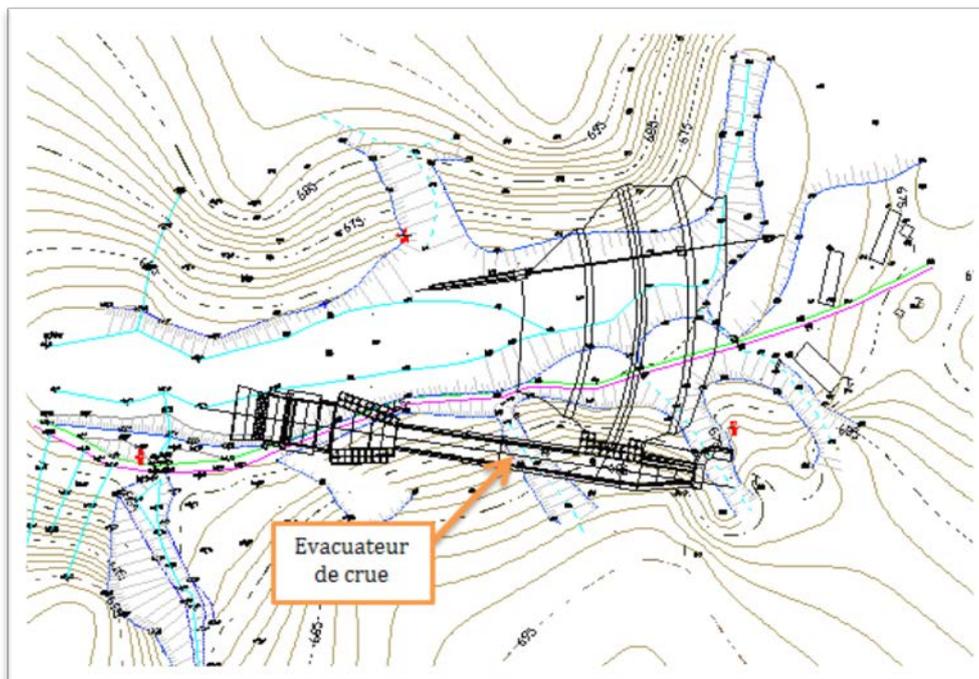


Figure IV.02: Plans de situation des ouvrages du petit Barrage Tamellahet [25]

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

III. Le glissement de talus de la rive gauche du petit barrage de "Tamellahet" :

III .1. Contexte d'analyse

Dans le cas du glissement de la rive gauche du petit barrage sur Oued "Tamellahet", l'étude conduit à définir une solution confortative et à exécuter des travaux de stabilisation. Cette solution doit tenir compte de la faisabilité des travaux liée à :

- ✚ l'investissement consenti,
- ✚ l'accessibilité du site,
- ✚ la période de l'année choisie pour l'exécution des travaux,
- ✚ La cinématique de glissement.

Elle doit tenir compte également d'autres aspects tels que :

- ✚ Les conditions de sécurité vis-à-vis de l'environnement et notamment les risques de désordres probables en phase des travaux,
- ✚ les délais impartis à la réalisation du confortement, qui dépendent de la gravité du phénomène et de l'urgence des travaux,
- ✚ La pérennité du système retenu et les possibilités d'entretien et de réparation,
- ✚ Les moyens en matériels et la technicité des entreprises locales.

Dans le présent mémoire, notre intérêt est porté beaucoup plus sur l'analyse du phénomène que sur les solutions de stabilisation et de confortement. **[25]**

III.2. Historique et manifestations relatives au glissement

Les travaux de réalisation du petit barrage Tamallahet ont été confiés à l'entreprise nationale hydro-transfert. Après les travaux préparatoires et de terrassements généraux, les travaux de terrassement de l'évacuateur de crues ont été entamés sans analyse de l'influence des mouvements de terrain sur le risque d'instabilité des versants et ont été donc dirigés beaucoup plus vers la géométrie de l'ouvrage et les modalités de sa réalisation que vers les risques de glissement. Les photos ci-après illustrent la manifestation du glissement enregistré. **[25]**

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »



Photo IV.01: Terrassements effectuées au pied de la rive gauche du barrage pour évacuateur des crues. [25]



Photo IV.02 : Apparition des fissures au niveau de la plate-forme effectuée au pied de la rive gauche pour la réalisation de l'évacuateur des crues. [25]

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »



Photo IV.03 : Pente avant et après terrassement. [25]



Photo IV.04 : Des glissements localisés [25]

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

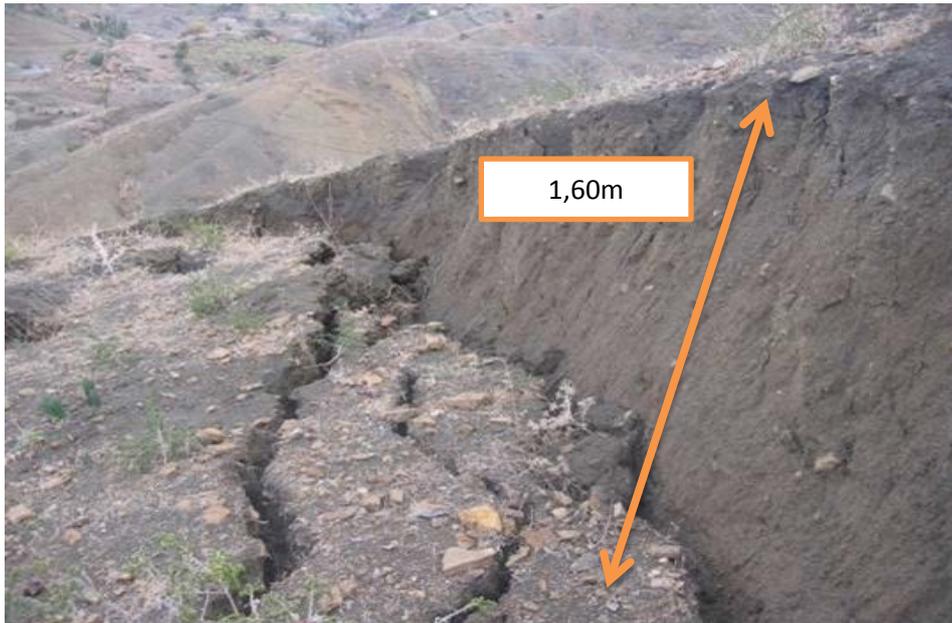


Photo IV.05 : Fissures pour différents plans de glissement avec un déplacement important ($\approx 1,60\text{m}$) [25]



Photo IV.06 : Apparition des fissures dues à l'instabilité de la pente avec loupes de glissement [25]

**CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT
BARRAGE DE « TAMELLAHET »**



Photo IV.07 : Apparition des glissements superficiels [25]



Photo IV.08 : Glissement d'un massif meuble et hétérogène. [25]

IV. Présentation du code de calcul servant à l'étude de stabilité

IV.1.Introduction

Plaxis est un programme d'éléments finis en deux et en trois dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Ce logiciel, développé par l'équipe du Professeur Vermeer nous permet la représentation des situations réelles en modèles plan ou axisymétrique.

Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. Les utilisateurs sont supposés être capables de travailler dans un environnement Windows. Pour se familiariser rapidement avec l'utilisation de cette interface et avec les caractéristiques principales du programme, L'interface d'utilisation de Plaxis se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves). [26]

Conçu par des géotechniciens numériques, le code éléments finis PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique. C'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard, avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangle à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc).

Du point de vue pratique le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit. Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volume réduits, faciles à consulter. L'ensemble des options par défaut (conditions aux limites) rend la mise en données aisée et rapide. Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné. Le système d'option par défaut et de solutions approchées spécifiques, qui sont un des fers de lance de l'outil de projet pour la géotechnique, est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassant, et enfin à améliorer la convivialité du logiciel [27]

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITE DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

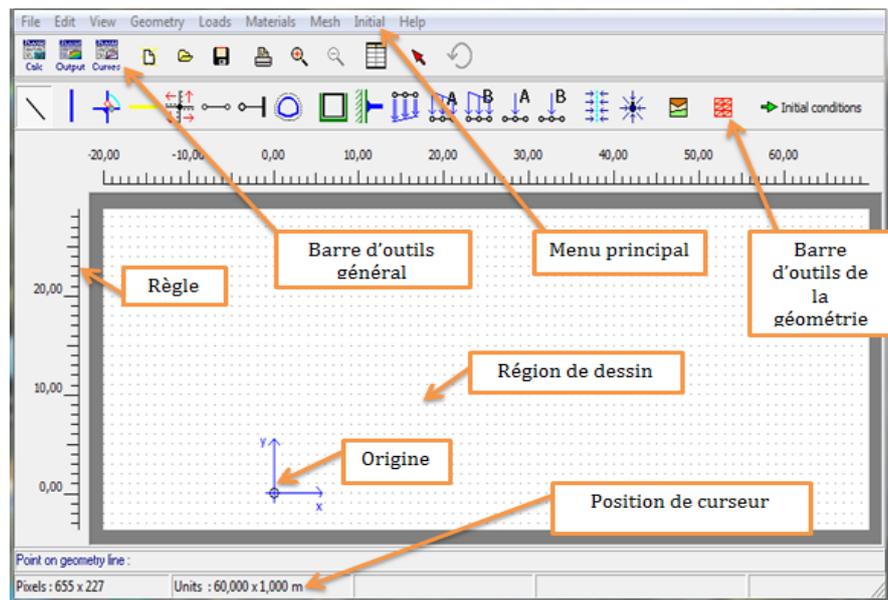


Figure IV.03: Menu de la fenêtre des entrées du programme.

IV.2.Objectif de Plaxis :

Objectifs de Plaxis est de fournir à l'utilisateur d'un code d'éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délais raisonnable en utilisant des modèles de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale.

IV.3.Les points forts de Plaxis

- La convivialité de l'interface pour la saisie des données et pour l'interprétation des résultats,
- Générateur automatique de maillage,
- Jeu complet de lois de comportement du sol et la possibilité de définir ses propres lois de comportements,
- Couplages avec les calculs d'écoulements et de consolidation,
- Prise en compte des éléments de structure et l'interaction sol-structure,
- Calcul de coefficient de sécurité et l'étude de stabilité.

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITE DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

IV.4. Les modèles de comportement utilisés dans Plaxis :

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux: depuis le modèle élastique-plastique de Mohr Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettent de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-viscoplastique des sols, aussi bien sous sollicitation monotone que cyclique.

La démarche suivie dans le développement du code Plaxis est différente. Un des objectifs de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code d'éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant des modèles de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique. [27]

IV.4.1. Modèle linéaire élastique

Le modèle linéaire élastique considère que le matériau est isotrope indéfiniment élastique. Autrement dit, il n'y a pas de notion de rupture jointe au matériau décrit par un tel modèle et son comportement sera identique quelle que soit la direction selon laquelle il est sollicité. Ainsi, toutes les déformations sont entièrement réversibles. Son comportement est décrit par la loi de Hooke en une dimension donnant ainsi une relation linéaire entre les contraintes et les déformations.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Avec ε la déformation unitaire dans la direction de la contrainte, σ , appliquée et E le module de Young du matériau. [28]

IV.4.2. Modèle de Mohr-Coulomb

Le modèle Mohr-Coulomb est l'un des modèles les plus utilisés. Le modèle bien connu de Mohr-Coulomb peut être considéré comme une approximation au premier ordre du comportement réel du sol. Ce modèle, élastique parfaitement plastique, nécessite cinq paramètres fondamentaux qui sont : le module d'Young, E, le coefficient de Poisson, ν , la cohésion, c, l'angle de frottement, ϕ , et l'angle de dilatance, ψ . Comme les ingénieurs géotechniciens sont habitués à utiliser ces cinq paramètres, et qu'ils disposent rarement d'autres données, une attention particulière sera portée à ce modèle classique de comportement.

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITE DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

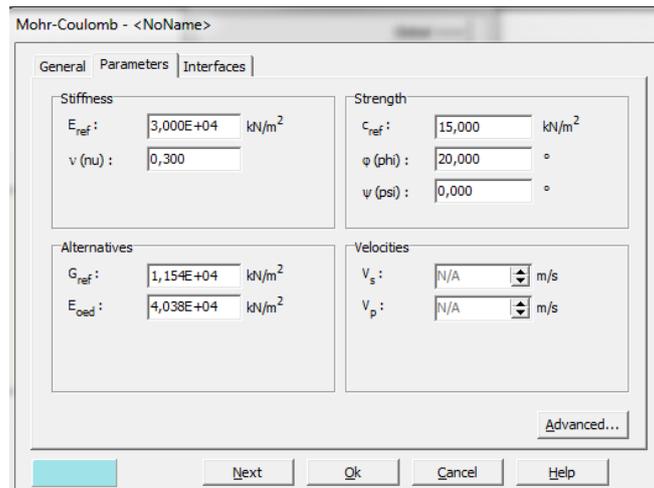


Figure IV.04 : Fenêtre des paramètres de Mohr -Coulomb

V. Etude de stabilité de talus de la rive gauche du petit barrage de "Tamellahet" :

V.1. Considérations générales

L'objectif de cette partie est d'analyser l'influence de la chronologie des travaux et des terrassements sur la stabilité des rives de barrage. Cette analyse est basée essentiellement sur la modélisation. L'application est faite sur l'évacuateur de crue de petit barrage de "Tamellahet". Plusieurs cas de modélisation ont été considérés :

Cas N° 01 : Analyse de la stabilité du versant à profil naturel,

Cas N° 02 : Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue,

Cas N° 03 : Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue et conjugaison des remblais de la digue à la côte retenue normale

Cas N° 04: Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue et conjugaison des remblais de la digue à la côte crête

Cas N° 05 : Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue combinés à un reprofilage, par anticipation, du profil naturel du versant gauche.

L'étude est menée en considérant les paramètres mécaniques et hydrauliques (tableau IV.1) concernant le matériau du talus de la rive gauche du barrage ainsi que ceux des remblais du barrage pour les cas de modélisation N°3 et 4. Ces paramètres ont été obtenus à partir des

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

résultats des reconnaissances géotechniques du barrage. Toutefois, et dans le cas de manifestation du glissement, il est considéré les paramètres mécaniques résiduels. Aussi, il est considéré au niveau de la modélisation le cas de diminution de la cohésion du versant

Tableau IV.1 : Caractéristiques des matériaux utilisées dans la modélisation

Sol	$\gamma_{sat}(\text{KN/m}^3)$	$\gamma_h(\text{KN/m}^3)$	$C(\text{KN/m}^2)$	$\varphi(^{\circ})$	K (m/jour)
Versant avant déblaiement	18	17	15	20	8.64×10^{-3}
Versant après déblaiement	18	17	Variable (2-15)	12	8.64×10^{-3}
Remblais du barrage	19	18	50	20	8.64×10^{-3}

Le profil du versant gauche du barrage considéré au niveau de la modélisation a été élaboré sur la base du plan topographique du site. Il est présenté sur la figure IV.5.

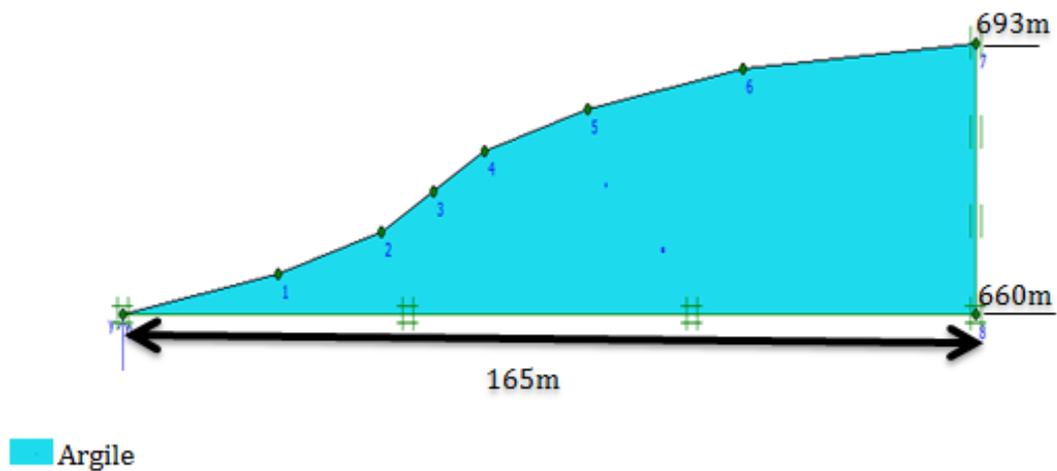


Figure IV.05 : Profil en travers du versant gauche du barrage

V.2. Résultats de la modélisation

V.2.1. Analyse de la stabilité du versant à profil naturel - Avant début des travaux

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITE DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

Au niveau de ce premier cas, l'étude de stabilité est menée sans avant le début des travaux de terrassement. L'objectif est de confirmer ou pas la stabilité du versant à l'état naturel et de pouvoir évaluer le degré d'influence des terrassements sur la stabilité.

La discrétisation du profil servant à la modélisation est représenté sur la figure IV.06.

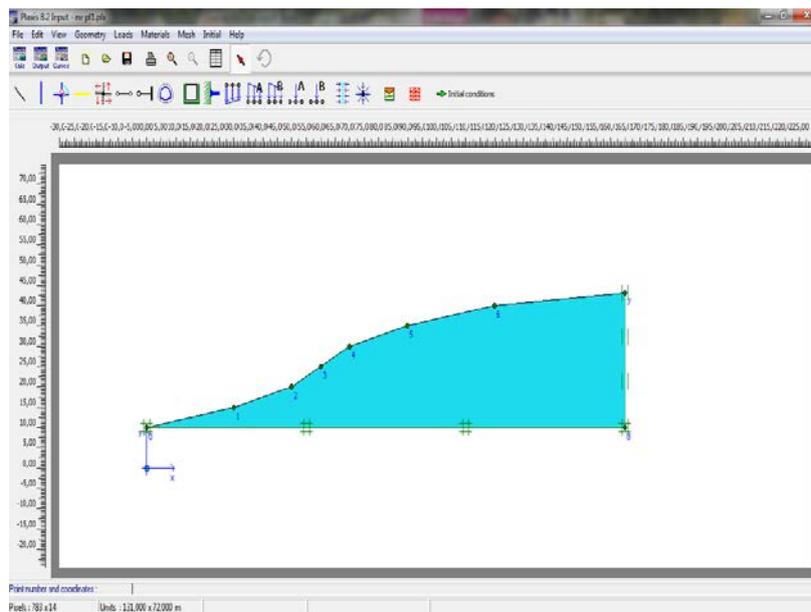


Figure IV.06 : Représentation du modèle géométrique du projet - Cas N°01

La figure IV.07 donne la déformation du profil en arrêtant les conditions aux limites

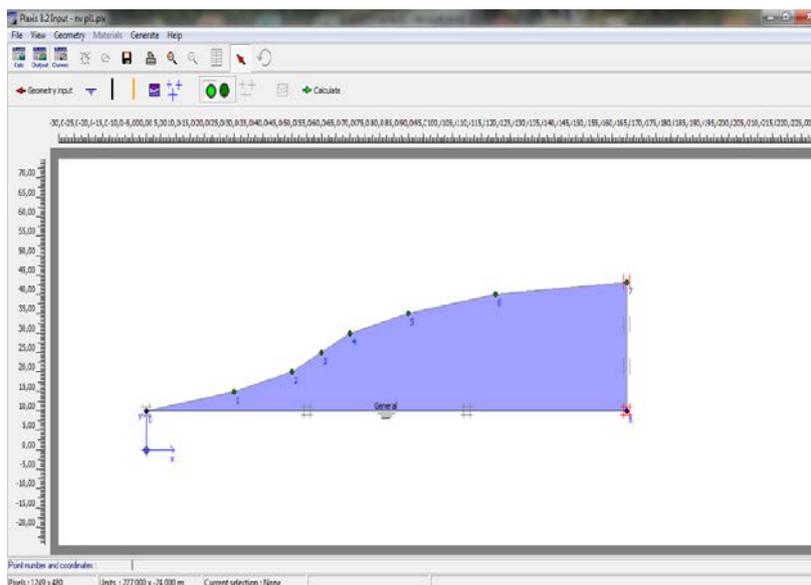


Figure IV.07 : Profil du talus avec conditions aux limites- Cas N°01

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

Les résultats graphiques de chaque cas analysé sont présentés sous la forme de variations de contraintes effectives et de valeur du coefficient de sécurité au glissement.

Les figure IV.8 et IV.9 illustrent respectivement le schéma représentatif du maillage du massif ainsi que les champs de contraintes effectives.

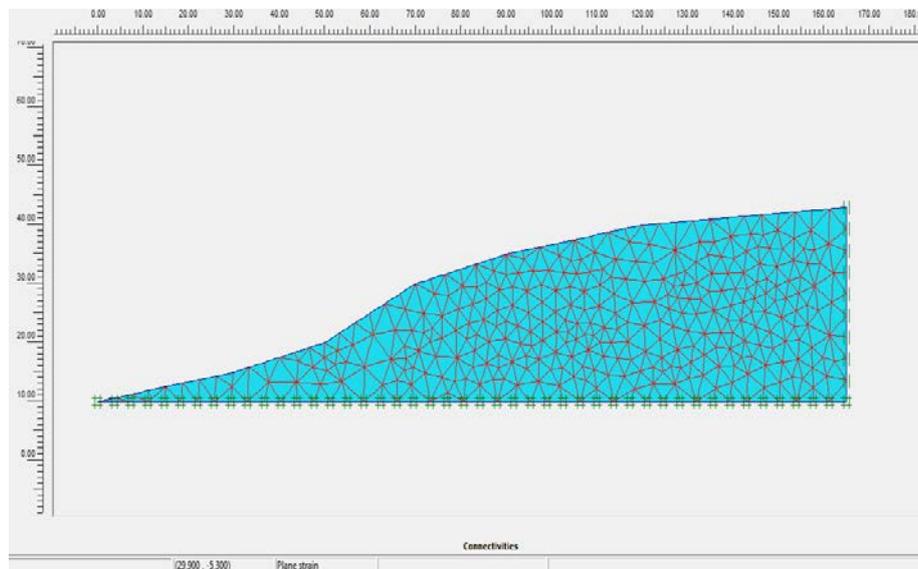


Figure IV.08. Maillage du modèle- Cas N°01

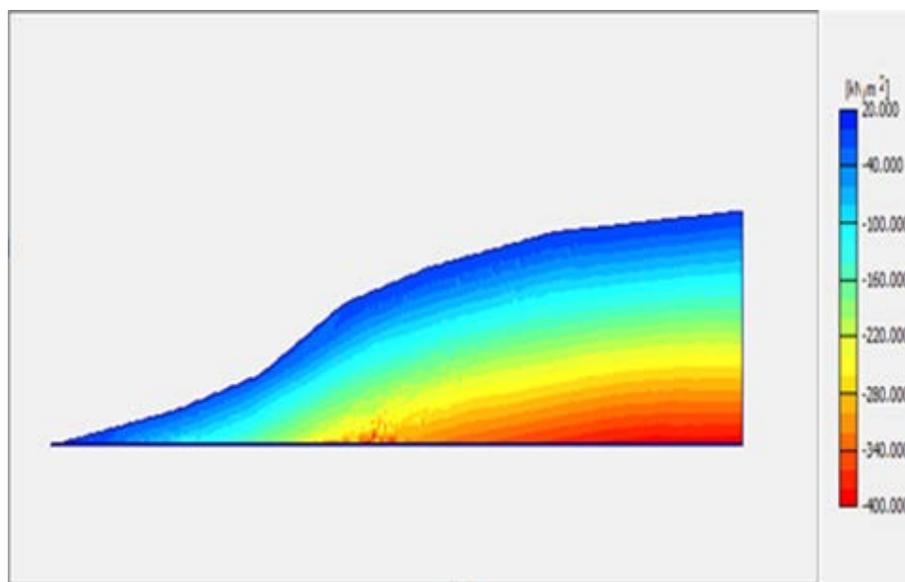


Figure IV.09 : Valeurs des contraintes effectives- Cas N°01

Le résultat de calcul de coefficient de sécurité de glissement de terrain naturel est représenté dans la figure IV.10

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITE DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

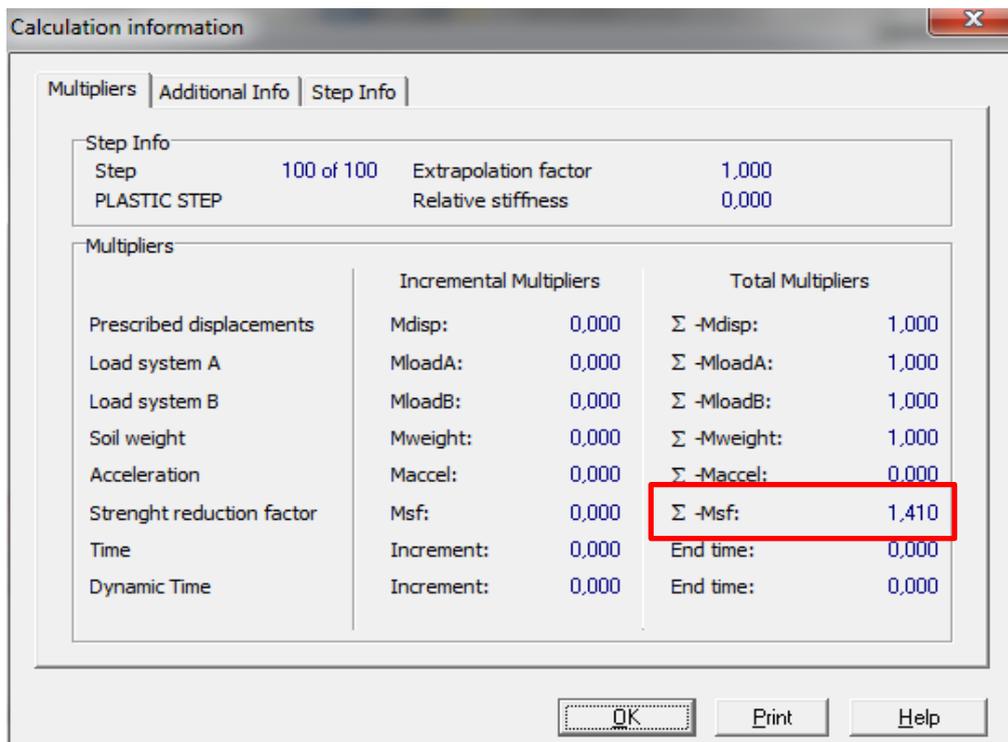


Figure IV.10 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N°01

V.2.2. Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue

Au niveau de ce deuxième cas d'étude de stabilité, il est considéré l'influence des terrassements de l'évacuateur des crues. Les dimensions de terrassement considéré sont celles relatives à la géométrie conceptuelle de l'évacuateur de crue. Le repère altimétrique a été considéré à la côte retenue normale fixant la côte du seuil du déversoir, soit 673.00 m.

Dans un premier temps, il est supposé que le massif est capable de mobiliser des cohésions relativement importantes. Dans une 2ème étape, il est tenu compte de l'influence de la diminution de la cohésion mobilisée.

La discrétisation du profil servant à la modélisation est représenté sur la figureIV.11.

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

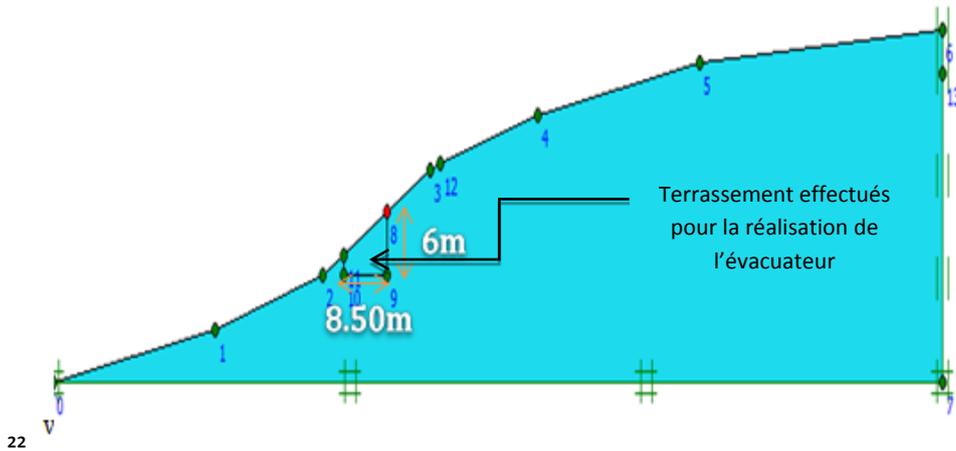


Figure IV.11 : Profil du versant après déblaiement- Cas N°02

La figure IV.12 : donne la déformation du profil en arrêtant les conditions aux limites

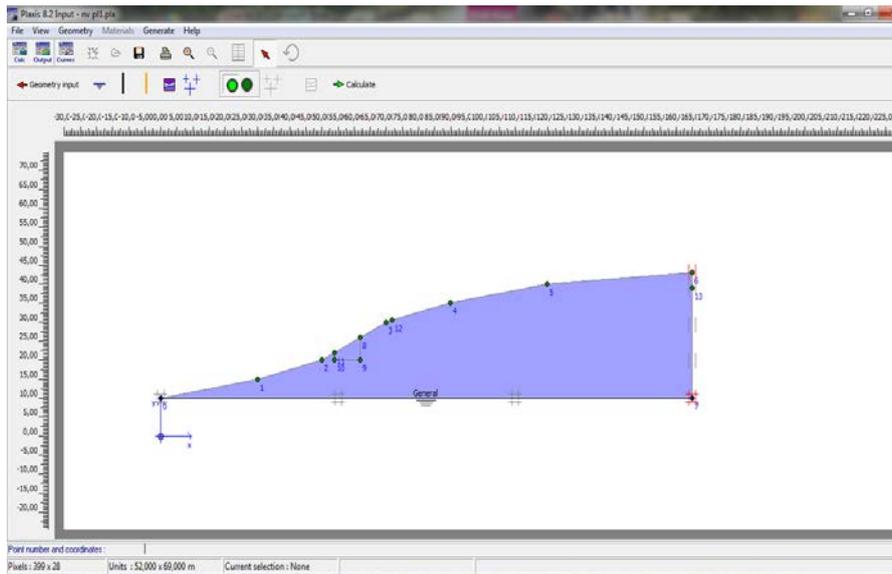


Figure IV.12 : Profil de talus avec conditions aux limites- Cas N°02

Les figures IV.08 et IV.09 illustrent respectivement le schéma représentatif du maillage du massif ainsi que les champs de contraintes effectives.

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

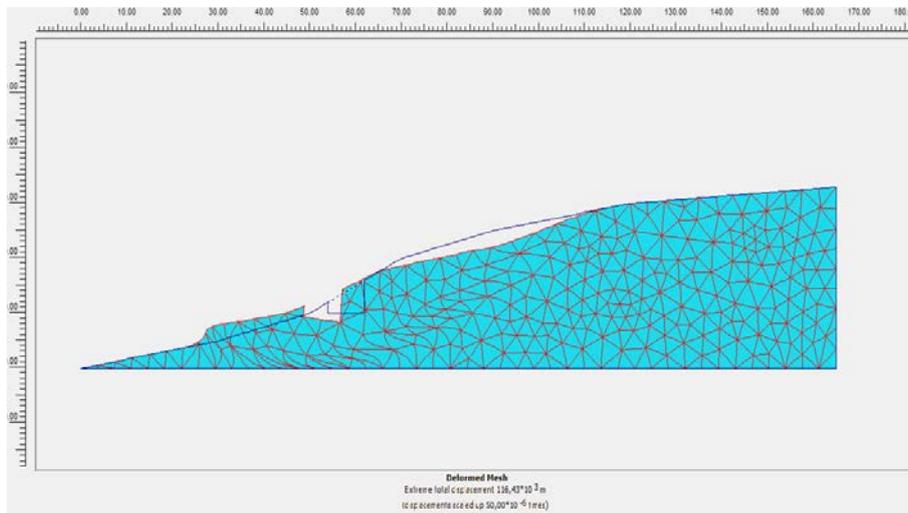


Figure IV.13 : Schéma représentatif de la déformation du maillage- Cas N°02

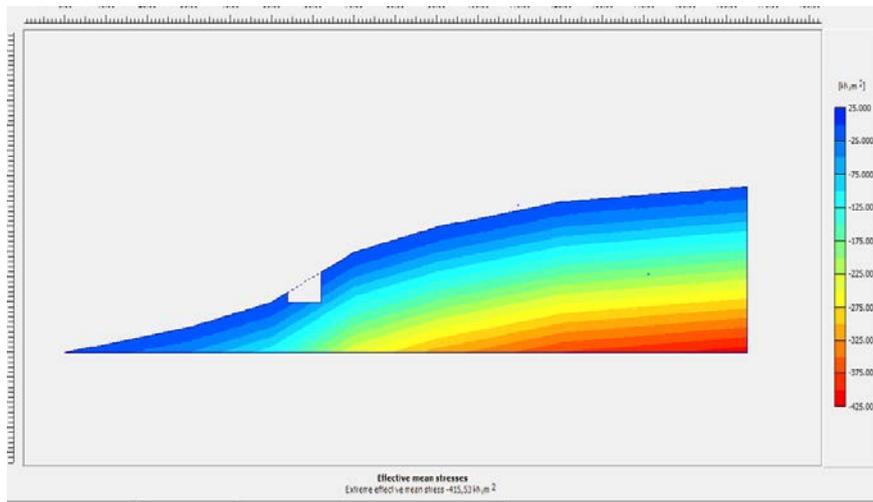


Figure IV.14 : versant après déblaiement : contraintes effectives- Cas N°02

Le résultat de calcul de coefficient de sécurité de glissement de terrain après déblaiement est représenté dans la figure IV.15

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

Multipliers	Incremental Multipliers		Total Multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel:	0,000
Strenght reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf:	0,971
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic Time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Figure IV.15 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N°02

V.2.3. Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue et effet de la cohésion mobilisée

Au niveau de ce cas de modélisation, il a été considéré une incapacité du sol du versant de mobiliser des cohésions importantes. A ce titre, une autre série de modélisation a été engagée respectivement pour des cohésions du massif de 10 et 2 KPa.

Les figures d'IV.16 à IV.19 représentent respectivement les déformations du massif ainsi que les valeurs des coefficients de sécurité au glissement

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

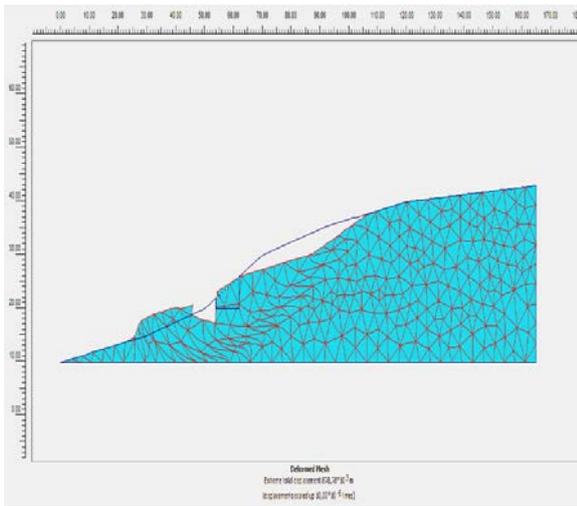


Figure IV.16 : Déformation du massif-Cas N° 02 avec influence de la cohésion(C= 10 KPa)

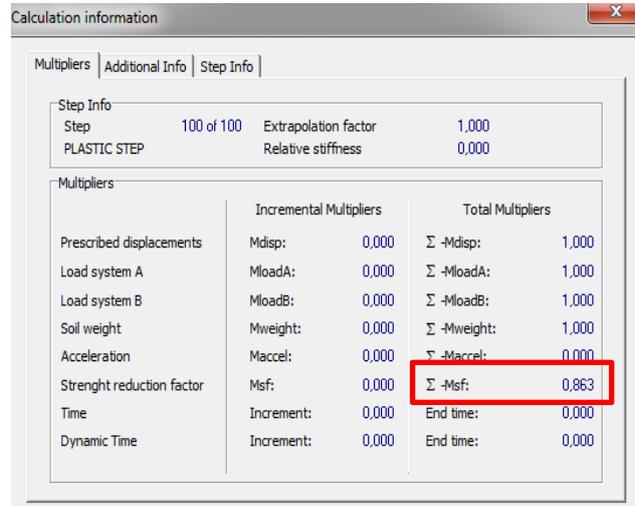


Figure IV.17 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N° 02 avec influence de la cohésion(C= 10 KPa)

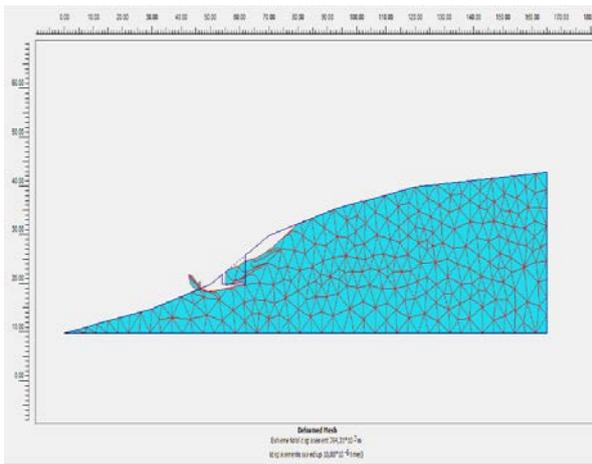


Figure IV.18 : Déformation du massif-Cas N° 02 avec influence de la cohésion(C= 2 KPa)

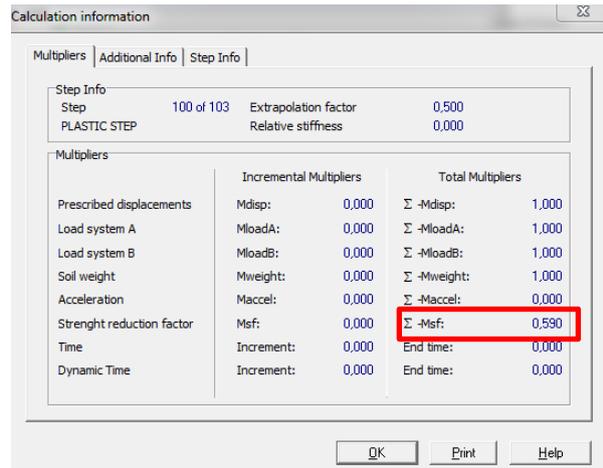


Figure IV.19 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N° 02 avec influence de la cohésion(C= 2 KPa)

V.2.4. Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue et conjugaison des remblais de la digue à la côte retenue normale

Dans ce cas de figure, il est considéré l'influence des terrassements de l'évacuateur sur la stabilité du versant gauche avec prise en compte de l'influence de la chronologie des travaux, en l'occurrence une cadence importante sur les remblais du barrage pour qu'ils puissent constitués une butée au mouvement du terrain. Dans un premier temps, il est considéré une hauteur des remblais coïncidant avec la côte de la retenue normale.

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

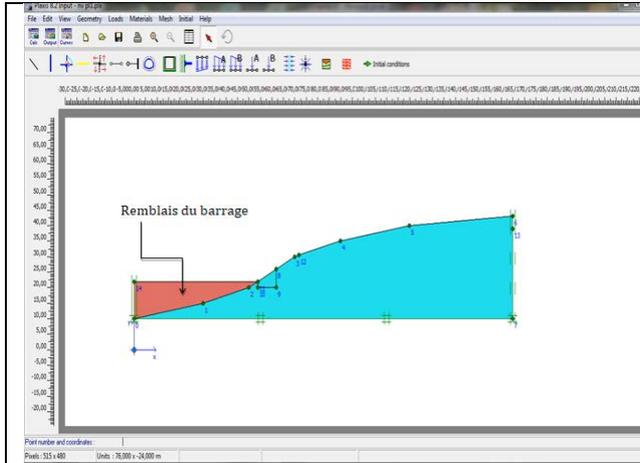


Figure IV.20 : Modèle géométrique-Cas N° 03 avec remblais du barrage à la côte retenue normale

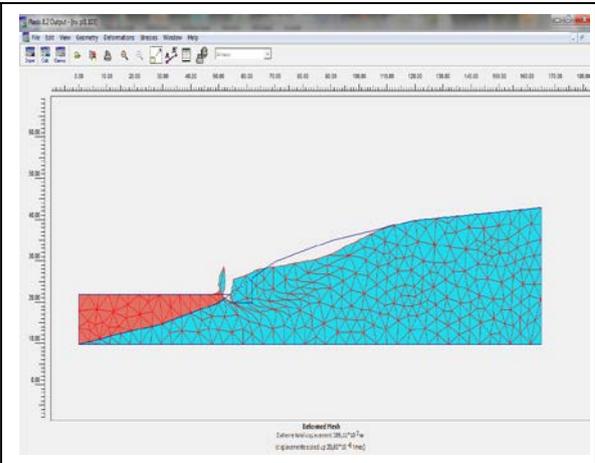


Figure IV.21 : Déformée-Cas N° 03 avec remblais du barrage à la côte retenue normale

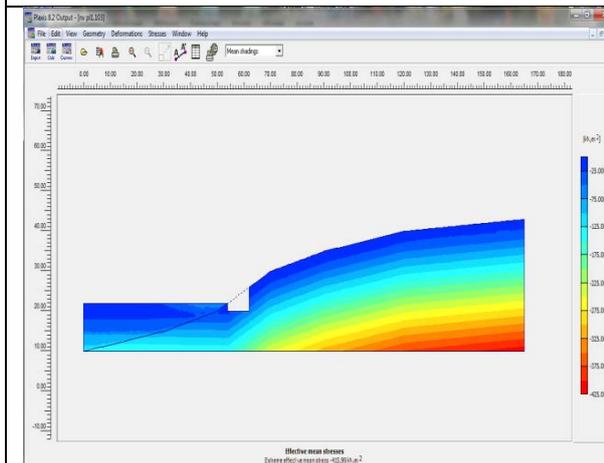


Figure IV.22 : Contrainte effectives -Cas N° 03 avec remblais du barrage à la côte retenue normale

Multipliers				
		Incremental Multipliers		Total Multipliers
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel:	0,000
Strenght reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf:	1,142
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic Time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Figure IV.23 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N° 03 avec remblais du barrage à la côte retenue normale

V.2.5. Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue et conjugaison des remblais de la digue à la côte crête

Le quatrième cas d'étude de stabilité est mené en considérant une influence de la chronologie des travaux. Ce cas suppose la réalisation totale des remblais de la digue et par la suite ceux relatifs à l'évacuateur de crue.

La discrétisation du profil servant à la modélisation, la déformation du maillage, les variations des contraintes effectives ainsi que la valeur du coefficient de sécurité sont représentés sur les figures d'IV.24 à IV.27.

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

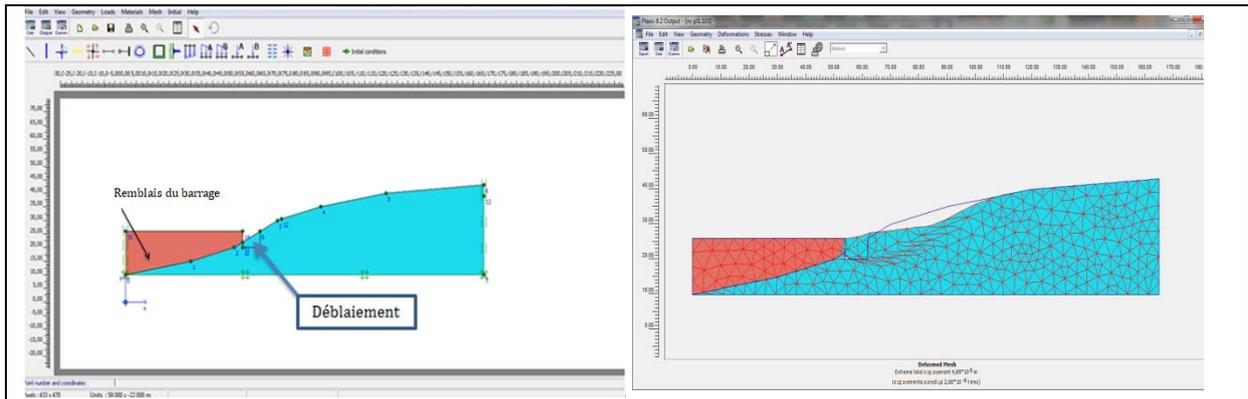


Figure IV.24 : Modèle géométrique-Cas N° 04 avec remblais du barrage à la côte crête

Figure IV.25 : Déformée-Cas N° 04 avec remblais du barrage à la côte crête

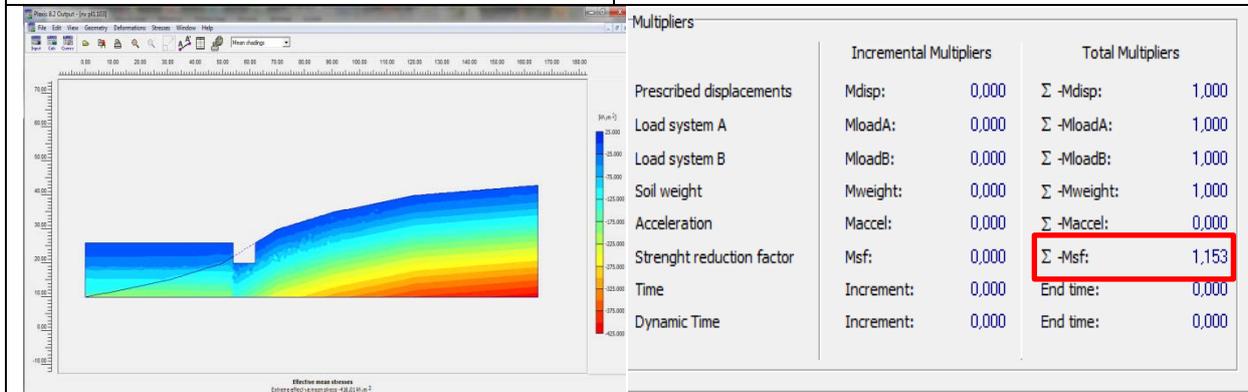


Figure IV.26 : Contrainte effectives -Cas N° 04 avec remblais du barrage à la côte crête

Figure IV.27 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N° 04 avec remblais du barrage à la côte crête

V.2.6. Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue combinés à un reprofilage, par anticipation, du profil naturel du versant gauche.

Ce cas de figure traite de la possibilité de traiter le versant gauche du barrage en termes de profil géométrique avant le démarrage des terrassements. Ce traitement consiste à reprofiler le versant en paliers dont l'angle des talus est considéré inférieur à l'angle de frottement interne du sol avec des risbermes de discontinuité de 2 m de large. Dans ce cas de modélisation, l'angle considéré est de 8°. Il reste clair que cette solution, bien que son avantage est d'assurer la stabilité du versant par simple traitement de son profil géométrique, elle reste comme même conditionnée, en matière de faisabilité technique et économique par les modalités d'accès et cubature des terrassements relatif au reprofilage.

La discrétisation du profil servant à la modélisation, la déformation du maillage, les variations des contraintes effectives ainsi que la valeur du coefficient de sécurité sont représentés sur les figures d'IV.28 à IV.31

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITE DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

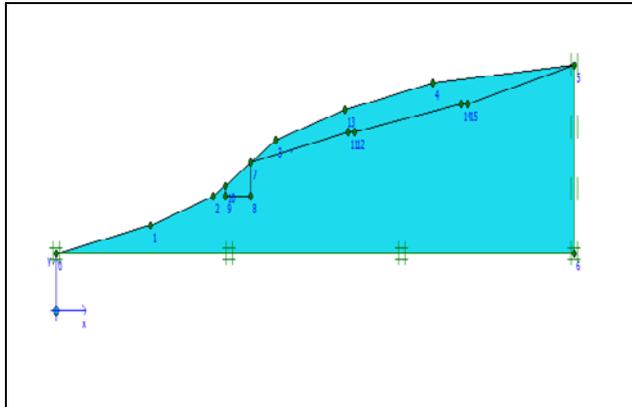


Figure IV.28 : Modèle géométrique-Cas N° 05 avec reprofilage du versant

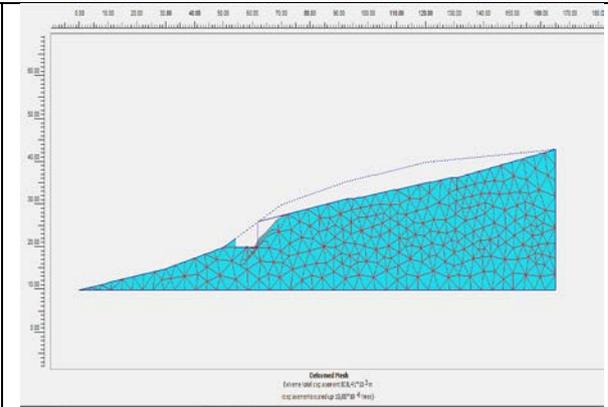


Figure IV.29 : Déformée- Cas N° 05 avec reprofilage du versant

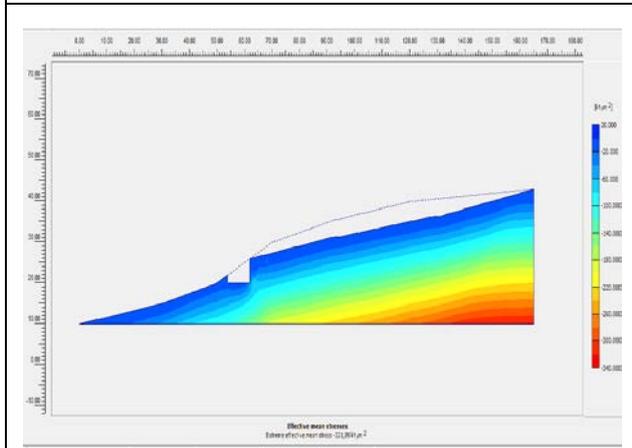


Figure IV.30 : Contrainte effectives - Cas N° 05 avec reprofilage du versant

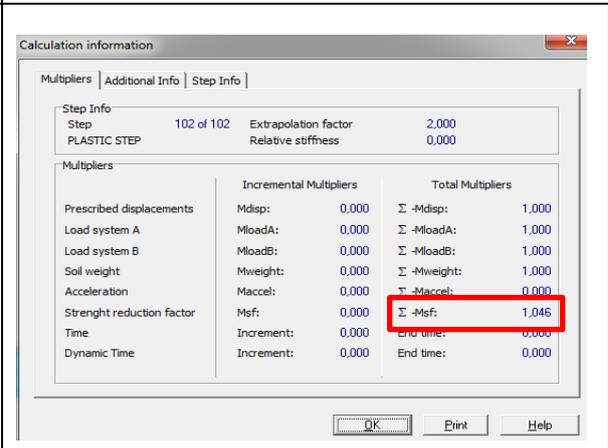


Figure IV.31 : Valeur du coefficient de sécurité - Cas N° 05 avec reprofilage du versant

V.3. Synthèse des résultats et interprétation

L'ensemble des résultats de la modélisation pour l'analyse de la sécurité du versant gauche du barrage contre le glissement sont récapitulés au niveau du tableau IV.2

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

Tableau IV.2 : Synthèse des résultats d'analyse de la stabilité du versant

Cas d'analyse	Coefficients de sécurité F_s
Cas N° 01 : Analyse de la stabilité du versant à profil naturel	$F_s=1.429$
Cas N° 02-a : Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue (C = 15 KPa)	$F_s=0.97$
Cas N° 02-b : Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue (C = 10 KPa)	$F_s=0.86$
Cas N° 02-c : Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue (C = 2 KPa)	$F_s=0.59$
Cas N° 03 : Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue et conjugaison des remblais de la digue à la côte retenue normale	$F_s=1.14$
Cas N° 04: Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue et conjugaison des remblais de la digue à la côte crête	$F_s=1.153$
Cas N° 05 : Analyse de la stabilité du versant avec influence des terrassements de l'évacuateur de crue combinés à un reprofilage, par anticipation, du profil naturel du versant gauche.	$F_s=1.04$

A travers l'analyse des coefficients de sécurité au glissement du versant, il ressort les constatations suivants:

- Le versant gauche du barrage Tamallahet présenté initialement des conditions de stabilité satisfaisante ($F_s = 1.43$)
- Les terrassements opérés au niveau de l'emprise de l'évacuateur de crue ont eu pour conséquence la déstabilisation du massif par la suppression de la butée de pied ($F_s = 0.97$).
- L'effet de la cohésion mobilisée par le massif sur la stabilité du versant est important. en effet, le coefficient de sécurité au glissement chute à $F_s = 0.86$ pour C = 10 Kpa et à $F_s = 0.59$ pour C = 2 KPa.
- L'influence de la chronologie des travaux a été mise en évidence d'une manière tangible. En effet, un planning des travaux fixant le début des terrassements de l'évacuateur après achèvement de remblais du barrage à la côte retenue normale mène le coefficient de sécurité au glissement à $F_s = 1.14$. La décision de poursuivre les remblais jusqu'à la côte

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STABILITES DE LA RIVE GAUCHE DU PETIT BARRAGE DE « TAMELLAHET »

crête du barrage fait augmenter légèrement le coefficient de sécurité à $F_s = 1.15$. Il reste clair que cette chronologie ne peut en aucun cas être adoptée sur les chantiers de barrages, mais peut constituer une solution de remède, à postériori, pour des situations similaires.

- Le traitement du versant par reprofilage de sa géométrie en adoptant des angles de talutage en fonction des caractéristiques mécaniques du sol est une action qui permet d'améliorer la stabilité au glissement du versant même avec des terrassements de l'évacuateur de crue supprimant la butée de pied.

CONCLUSION GENERALE

L'acte de construire s'est considérablement complexifié ces dernières années. Cette complexification concerne au premier rang la partie géotechnique des ouvrages, terrassements, soutènements et fondations en particulier. Sans une bonne maîtrise de la géotechnique, le projet ne peut réussir. La géotechnique est une science complexe. Elle est un savant mélange entre théorie et empirisme, entre mécanique des milieux continus et expérience personnelle des ingénieurs. La modélisation de l'interaction sol-structure est conditionnée par la nature des sols, par la nature et l'intensité des efforts, par la géométrie du contact entre sol et structure, par les techniques de réalisation et par le phasage des travaux.

Le coût d'une étude géotechnique est sans rapport avec les enjeux financiers d'un projet. Ainsi, une étude géotechnique complète, comprenant toutes les missions, représente un très faible pourcentage du coût des ouvrages.

Les terrassements sur des sols vulnérables, dans des conditions topographiques particulières, pour des ouvrages à grand enjeu sécuritaire doivent faire appel, désormais, à l'étude géotechnique des terrassements. Cette étude doit obligatoirement intégrer des aspects liés à la stabilité d'ensemble, au mode d'extraction des terres et leurs conditions de réemploi en remblai, à la pente des talus de déblais et de remblais, au drainage à mettre en œuvre, aux techniques d'amélioration des sols pour limiter l'amplitude des tassements et enfin aux conditions de réalisation des travaux. L'étude géotechnique de terrassement doit fournir des éléments précis relatifs aux paramètres de cisaillement des formations talutées et des assises des remblais, aux paramètres de déformabilité (amplitude et durée) des sols sous les futurs remblais et aux paramètres spécifiques de comportement des sols (liquéfaction, instabilité structurelle,...).

Telles sont autant de considérations à prendre en charge pour une vision globale de la problématique. Le cas du barrage de Tamallahet est très instructif. En effet, les études initiales du barrage ne prévoyaient nullement des investigations géotechniques sur le versant gauche du barrage devant recevoir des terrassements importants pour abriter l'ouvrage d'évacuation des crues. La topographie et la nature géologique du terrain devait en principe attirer l'intention du concepteur, au moins en ce qui concerne l'influence des

précipitations sur l'érosion du versant, sur sa stabilité globale et sur l'impact éventuel sur les travaux de génie civil de l'évacuateur de crues.

La contrainte enregistrée sur le chantier du barrage (arrêt des travaux, reprise des études de stabilité, recherche des solutions de confortement...etc) a porté un énorme préjudice quant à l'économie du projet et aux délais de sa livraison.

A travers l'analyse de la stabilité au glissement du versant gauche du barrage Tamallahet dans différents cas de figure et en tenant compte des aspects liés à l'influence des mouvements de sol sur la stabilité ainsi qu' à la chronologie des travaux a permis de déduire des enseignements forts intéressants. Ces enseignements reposent sur le principe de l'obligation d'anticiper ce type de pathologies lors des investigations s'intégrant dans le cadre des études de conception du barrage.

- Le versant gauche du barrage Tamallahet présenté initialement des conditions de stabilité satisfaisante, les terrassements opérés au niveau de l'emprise de l'évacuateur de crue ont eu pour conséquence la déstabilisation du massif par la suppression de la butée de pied. L'influence de la chronologie des travaux est importante pour des versants présentant des situations particulières (topographiques et géologiques). Le traitement du versant peut constituer des actions préliminaires quant aux terrassements pour les ouvrages sous réserves d'une vérification de la faisabilité technique et économiques de ces travaux préparatoires.

En guise de synthèse, et pour ce type de situations géotechniques et pour les projets de barrages, nous pouvant lancer quelques recommandations permettant d'éviter ou de maîtriser de telles situations en l'occurrence :

- Intégrer, au niveau des cahiers des charges des études de barrages, l'analyse de la stabilité des versants avoisinants, et ceux devant recevoir des ouvrages ou parties d'ouvrages,
- intégrer aussi, lorsque cela est nécessaire au niveau de la consistance des études de conceptions, des études géotechniques de terrassements pour des zones présentant des risques ou pouvant présenter des risques suite à l'impact des travaux,
- Instaurer l'obligation des reconnaissances géotechniques complémentaires, lorsque cela est nécessaire, pour des situations de site présentant des enjeux importants de sécurité,

- Procéder à l'installation d'appareil de surveillance sur les versants traités éventuellement lors des travaux et qui peuvent présenter des risques d'instabilité suite au marnage du lac du barrage,
- Engager des études au préalable sur la faisabilité économique et technique de traitement systématique des versants présentant des risques de stabilité,
- Intégrer, dans le choix du type d'évacuateurs de crue, les contraintes liées au versant instable et aux coûts de leur traitement et stabilisation

Références bibliographiques

- [1] <https://www.m-habitat.fr> › Travaux de terrassement › Terrassement par étape
- [2] <https://fr.scribd.com/document/380695912/types-de-terrassement-Les-terrassements-pdf-pdf>
- [3] <https://www.travaux.com/guide-des-prix/terrassement/differentes-etapes-travaux-de-terrassement>
- [4] <https://fr.scribd.com/document/369176561/Terrassements-2013-pdf>
- [5] CD-DTU V2 - Edition 158 - Décembre 2009 Document : DTU 12 (DTU P11-201/MEM) Terrassement pour le bâtiment - (Indice de classement : P11-201)
- [6] Lefriki Souad Juin 2015, EFFET DE LA VARIATION DE LA COHESION SUR LE COMPORTEMENT DES PENTES. Mémoire de Master 2ème année, Université Mohamed Khider ; Faculté des Sciences et de la technologie Département de Génie Civil et Hydraulique, Biskra
- [7] : Alp'Géorisques Septembre 2004, "Les mouvements de terrain" ; ministère de l'écologie et du développement durable, Page (5), France.
- [8] Laurent DUBOIS 14/03/2017, Stabilité des pentes ; COTITA Centre-Est, Cerema (centre d'études et expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement).
- [9] : Djamel Eddine Benouis 2010, "étude d'un glissement de terrain par différentes méthodes" ; mémoire d'ingénieur ; ingénieure d'état en génie civil option construction civil et industriel ; université de Saida ; (Alger).
- [10] : Aissa Mohamed hamza ; Maddouche khadidja 2010/2011; " analyse et modélisation d'un glissement de terrain" ; mémoire master ; Université De Khemis Miliana ; page (16) ; Algérie.
- [11] Clément DESODT ; Julien LAUNAY ; Hélène HORSIN MOLINARO 02/05/2017; Les glissements de terrain, modélisation et prévision ; école normale supérieure, Paris-Saclay.
- [12] Lee W. Abramson et Al 2002, "Slope stability and stabilization methods", USA
- [13] Dadouche-zaroual F 2007, Stabilité des talus en remblai sur sols mous, 25ème rencontres de l'AUGC, Bordeaux
- [14] Durville Jean-Louis et Al 1988, Stabilité des pentes et glissement en terrains meubles, LCPC techniques de l'ingénieur.

- [15]** Mohamed KHEMISSA 2006, METHODES D'ANALYSE DE LA STABILITE ET TECHNIQUES DE STABILISATION DES PENTES, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur - JNGG' 2006 Lyon (France)
- [16]** Pr. RHOZLANE & ABOULHASSANE Juin 2014, Conception de barrages .Ecole Hassania des Polytechnique de Montréal Travaux Publics.
- [17]** PNUD/OPE 1987, Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du nord. Guide Maghrébin pour l'exécution des études et des travaux de retenues collinaires. Projet RAB/80/011.
- [18]** Boussinesq, J. V. 1907, Théorie approchée de l'écoulement de l'eau sur un déversoir en mince paroi et sans contraction latérale. Gauthier-Villars, Paris, France.
- [19]** Drouhin, G., Mallet, Ch., Pacquant, J. 1951, Contribution to the study of the rate of flow and the determination of flood discharge, ICOLD, 4th congress, New Delhi. India.
- [20]** Ginocchio, R 1959, Aménagements hydroélectriques. Eyrolles .
- [21]** Maglakélidzé V. 1984, Ouvrages hydrotechniques. Polycopié ENIT.
- [22]** Alberto Gonzalez-Merino, Hydroplus, Quipolly dam: a case study on customizing fusegates® design for adverse spillway conditions, 92851 Rueil-Malmaison Cedex, France.
- [23]** DURAND J.M., ROYET P. et MERIAUX P 1999, Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale, EIER-CEMAGREF Éditions.
- [24]** Gérard DEGOUTTE (ENGREF).barrage en remblai.in PETITS BARRAGES, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi.
- [25]** Rapport sur le glissement de talus de la rive gauche du Petit barrage de "Tamellahet",
- [26]** Brinkgreve, R.B.J ., Al-Khoury, R., Bakker, K.J., Bonnier, P.G., Brand, P.J.W., Broere, W.,Burd, H.J., Soltys, G., Vermeer, P.A., Waterman, D., Simon, B., Bernhardt, V., Reboul, M 2003.Manuel de référence, University of Technology and PLAXIS bv, Pays-Bas, Version 8.
- [27]** KEDDOURI, A 2011, Etude des pathologies de la digue de oued kreirech wilaya de Djelfa, mémoire de magister, à l'université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.
- [28]** PLAISANT, A 2013, Analyse numérique du comportement sismique d'un barrage en enrochement avec un noyau en béton bitumineux, diplôme de maitrise et sciences appliquées, à l'université de Montréal.